

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

**Metody zpracování obrazu pro měření a třídění skleněných
tvarových kamenů**

**Image Processing Methods for Measuring and Sorting of
Shaped Glass Stones**

2015

Bc. Filip Volný

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Filip Volný

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2612T059 Mobilní technologie

Téma:

Metody zpracování obrazu pro měření a třídění skleněných tvarových kamenů

Image Processing Methods for Measuring and Sorting of Shaped Glass Stones

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je aplikace metod strojového vidění pro hodnocení rozměrů, tvarů a kvality bižuterních kamenů. Předpokládá se aplikování metody rozpoznávání geometrických tvarů kamenů a návrh optické soustavy. Hlavní důraz bude kladen na optimalizaci algoritmů (hledání hran, bodů, významných vad apod.) s ohledem na rychlost zpracování. Předpokládá se využití nástrojů LabVIEW, případně Vision Assistant.

Body zadání:

1. Srovnání kamerových měření a testů s ostatními metodami měření a testování. Výhody, nevýhody strojového vidění.
2. Rozbor problematiky inspekcí bižuterních kamenů
3. Návrh a implementace algoritmu pro vyhodnocení dat z kamerového měření do PC-based řešení.
4. Optimalizace rychlosti zpracování
5. Zhodnocení dosažených výsledků závěrečné práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

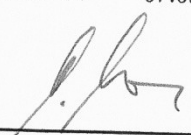
- [1] Vlach, J., Havlicek J., Vlach M. Začínáme s LabVIEW. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 247 s. ISBN 978-80-7300-245-9.
- [2] Hlavac, V., Sonka M. Počítačové vidění. Praha: Grada 1992. ISBN 80-85424-67-3.
- [3] Sonka M., Hlavac V., Boyle R.: Image Processing, Analysis, and Machine Vision, 3rd edition, Thomson Learning, Toronto, April 2007, 821 p, ISBN 049508252X. Dostupné z: <http://www.engineering.uiowa.edu/~dip/LECTURE/lecture.html>
- [4] NI Vision Assistant Tutorial 2012, VA_Tutorial.PDF, součást instalace LabVIEW 2012.
- [5] NI Vision Builder for Automated Inspection Tutorial 2012, VBAI_Tutorial.pdf, součást instalace LabVIEW 2012.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Petr Bilík, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015



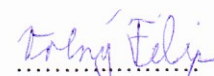
doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 5. května 2015


.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu, doc. Ing. Petru Bilíkovi, Ph.D. za odbornou pomoc, vstřícný přístup a podnětné konzultace a rady při vytváření této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Jaroslavu Vlachovi, Ph.D., který mi umožnil vypracovat tuto práci pro firmu Preciosa a.s.

Abstrakt

Cílem této diplomové práce bylo vytvořit optickou soustavu, kterou bude možné použít ve strojovém vidění, dále získat obrazová data, která budou splňovat určitá kritéria, a následně tato data poskytnout pro další zpracování. Optická soustava obsahuje vhodně vybrané komponenty – kameru, objektiv a osvětlení. Objektem, který byl snímán a dále analyzován, jsou bižuterní skleněné kameny. Tyto kameny obsahují tzv. hrubé výrobní vady, které ovlivňují jejich opticko-estetické vlastnosti, a je proto nutné je ve výrobě detekovat a vyřadit. V současné době se tato kontrola provádí ručně a tudíž subjektivně. Algoritmy pro získání a předzpracování obrazu jsou napsány v programovacím prostředí LabVIEW.

Tento výzkum byl prováděn pro firmu Preciosa a.s.

Klíčová slova

Strojové vidění; bižuterní kameny; optická soustava; kamera; objektiv; osvětlení; algoritmus; LabVIEW; L802k; Basler; zpracování obrazu

Abstract

The objective of this diploma thesis was to create an optical system, which can be used in machine vision, to acquire image data, which have to meet certain condition, and then to pass this data to additional processing. The optical system is composed of appropriately selected components – camera, lens and illumination. Objects, which were scanned and analyzed, are jewelry stones. These stones contain so called rough production defects. These defects are influencing optical-esthetic attributes and that is reason for its detection and exclusion. Currently the control of jewelry stones is done by people and that control is subjective. Algorithms for acquiring images and image preprocessing were created in programming environment called LabVIEW.

The research was made for Preciosa a.s. company.

Key words

Machine vision; jewelry stones; optical system; camera; lens; illumination; algorithm; LabVIEW; L802k; Basler; Image processing

Seznam použitých zkratk

| Zkratka | Anglický význam | Český význam |
|-------------|---|---|
| API | Application Programming Interface | Rozhraní pro tvorbu aplikací |
| CCD | Charge-Coupled device | Zařízení s vázanými náboji pro snímání obrazové informace |
| CCT+ | Camera Link Configuration Tool Plus | Program pro konfiguraci kamer s rozhraním Camera Link |
| CMOS | Complementary Metal–Oxide–Semiconductor | Komplementární polovodič pro snímání obrazové informace |
| CPU | Central Processing Unit | Centrální procesorová jednotka |
| DCAM | Digital Camcorder | Digitální kamera |
| DOF | Depth of Field | Hloubka ostrosti |
| DP | - | Diplomová práce |
| FOV | Field of View | Zorné pole |
| FPGA | Field Programmable Gate Array | Programovatelné hradlové pole |
| GPIB | General Purpose Interface Bus | Sběrnice pro měřicí přístroje |
| GPU | Graphic Processing Unit | Grafická procesorová jednotka |
| HW | Hardware | Fyzické komponenty počítače |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers | Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství |
| IMAQ | Image Acquisition | Získání obrazu/snímku |
| IR | Infra Red | Infračervený |
| LED | Light Emitting Diode | Dioda emitující světlo |
| LPS | Lines per Second | Řádková frekvence |
| PC | Personal Computer | Osobní počítač |
| px | Pixel | Obrazový bod |
| PXI | PCI eXtensions for Instrumentation | Rozšíření PCI pro instrumentace |
| ROI | Region of Interest | Oblast zájmu |
| TCP | Transmission Control Protocol | Protokol transportní vrstvy |
| USB | Universal Serial Bus | Univerzální sériová sběrnice |

| | | |
|------------|-------------------------|------------------------|
| UV | Ultra Violet | Ultrafialový |
| VPN | Virtual Private Network | Virtuální privátní síť |
| WD | Working Distance | Pracovní vzdálenost |

Seznam použitých termínů

| Termín | Význam termínu |
|-----------------------------|--|
| Bandpass filtr | Filtr typu pásmová propust |
| Blooming efekt | Jev v obraze, který je způsoben rozlíváním náboje z jedné světlocitlivé buňky senzoru kamery do okolí v jednom směru |
| Brilance | Schopnost bižuterního kamene změnit směr dopadajícího světla tak, aby to u pozorovatele vyvolalo maximální estetický dojem |
| Clonové číslo f | Poměr ohniskové vzdálenosti optické soustavy a průměru vstupní čočky |
| Expoziční doba | Čas, kdy jsou fotocitlivé buňky čipu kamery vystaveny přímé interakci s dopadajícími fotony |
| Frame Grabber | Zásuvná komunikační karta pro sběr a zobrazení obrazových dat |
| Gain | Parametr kamer, pomocí kterého lze zvýšit citlivost kamery při zachování expoziční doby |
| Hloubka ostrosti | Rozmezí mezi nejvzdálenějším a nejbližším bodem, které jsou na snímku vidět s přijatelnou ostrostí |
| Jiskra | Schopnost bižuterního kamene měnit intenzitu vystupujícího světla při drobné změně směru pozorování |
| Kvadrurní enkodér | Zařízení, jehož výstupem jsou dva fázově posunuté signály, které lze použít pro triggrování kamery |
| Longpass filtr | Filtr typu horní propust |
| Machine Vision | Strojové vidění |
| Obrazová fúze | Sloučení několika zdrojových obrazů do jednoho |
| Oheň | Schopnost bižuterního kamene rozkládat bílé světlo na jeho spektrální složky |
| Ohnisková vzdálenost | Vzdálenost mezi středem čočky objektivu a senzorem kamery |
| Optická soustava | Vhodně sestavený fungující celek složený z kamery, objektivu, filtru, osvětlení a snímaného objektu |
| PC-based řešení | Řešení založené na hardwaru osobního počítače |
| Pixel | Obrazový bod |
| Pracovní vzdálenost | Vzdálenost mezi čelem čočky objektivu a snímaného objektu |

| | |
|-------------------------------|--|
| Řádková frekvence | Počet řádků pixelů, které kamera dokáže nasnímat za jednu sekundu |
| Řádková kamera | Kamera se senzorem, který má pouze jeden řádek pixelů |
| Shading Correction | Funkce kamery, která zajišťuje kalibraci pixelů tak, aby stejné množství dopadajících fotonů vytvořilo stejné množství náboje ve všech buňkách |
| Shortpass filtr | Filtr typu dolní propust |
| Similizační vrstva | Tenká vrstva kovu natažená na spodek bižuterního kamene |
| Snímací frekvence | Počet snímků, které kamera dokáže nasnímat během jedné sekundy |
| Telecentrický objektiv | Objektiv s konstantním zvětšením, nezávislým na pracovní vzdálenosti – eliminace perspektivního zkreslení |
| Trigger | Spouštěč snímání |
| Zorné pole | Oblast, kterou je daná optická soustava schopna nasnímat |

Obsah

| | |
|---|--------|
| Úvod..... | - 3 - |
| 1 Srovnání kamerových měření a testů s ostatními metodami měření a testování..... | - 4 - |
| 1.1 Lidský zrak | - 4 - |
| 1.2 Strojové vidění | - 4 - |
| 1.3 Srovnání lidského oka a kamery | - 4 - |
| 1.4 Optická soustava | - 6 - |
| 1.4.1 Kamera | - 6 - |
| 1.4.2 Objektiv | - 8 - |
| 1.4.3 Filtry | - 12 - |
| 1.4.4 Osvětlení..... | - 16 - |
| 1.5 Přehled kamerových komunikačních rozhraní | - 21 - |
| 1.5.1 Gigabitový Ethernet | - 22 - |
| 1.5.2 USB 3.0 | - 23 - |
| 1.5.3 FireWire (IEEE1394) | - 24 - |
| 1.5.4 Camera Link | - 24 - |
| 1.5.5 CoaXPress | - 25 - |
| 2 Rozbor problematiky inspekcí bižuterních kamenů | - 26 - |
| 2.1 Popis částí kamenů | - 26 - |
| 2.2 Vlastnosti bižuterních kamenů a jejich vady | - 27 - |
| 2.2.1 Popis jednotlivých vad a jejich kontroly | - 27 - |
| 3 Návrh a implementace algoritmu pro vyhodnocení dat z kamerového měření do PC-based řešení | - 32 - |
| 3.1 Vývojové prostředí LabVIEW | - 32 - |
| 3.1.1 IMAQ Vision..... | - 35 - |
| 3.2 Návrh optické soustavy | - 36 - |
| 3.2.1 Varianta s plošnou kamerou | - 37 - |
| 3.2.2 Varianta s řádkovou kamerou..... | - 39 - |
| 3.2.3 Konfigurace kamery L802k pomocí programu CCT+ | - 43 - |
| 3.3 Popis algoritmů | - 47 - |

| | | |
|-------|--|--------|
| 3.3.1 | Algoritmus pro snímání obrazu | - 47 - |
| 3.3.2 | Algoritmus pro rozdělení obrazu na jednotlivé bižuterní kameny | - 52 - |
| 4 | Optimalizace rychlosti zpracování | - 55 - |
| 5 | Zhodnocení dosažených výsledků závěrečné práce | - 57 - |
| | Závěr | - 61 - |
| | Použitá literatura | - 62 - |
| | Seznam příloh..... | I |

Úvod

Průmyslová automatizace vždy vedla ke snížení nákladů na výrobu, ke zrychlení výroby a zvýšení počtu vyrobených kusů za časovou jednotku. Větší množství výrobků ale potřebuje více prostředků na kontrolu jejich kvality. Požadavky na jakost produktů jsou stále přísnější, a je proto nutné zajistit opravdu kvalitní kontrolu. V tomto odvětví se v současnosti začíná velmi hojně využívat tzv. strojové vidění. Jedná se o využití průmyslových kamer ke spolehlivé kontrole a velmi přesnému měření výrobků. Průmyslová automatizace pomocí strojového vidění spočívá zjednodušeně v tom, že kamera nasnímá daný výrobek a jeho obraz přenese do počítače. V počítači proběhne pomocí algoritmů vyhodnocení, zda výrobek splňuje kvalitativní požadavky, a na základě výsledku je buď zařazen mezi prodejné, nebo neprodejné kusy. Cílem této diplomové práce bylo navrhnout optickou soustavu, kterou bude možné využít pro kontrolu bižuterních kamenů, dále získat obrazová data, která budou splňovat určitá kritéria, a následně tato data poskytnout pro další zpracování.

V první kapitole jsou popsány rozdíly mezi strojovým viděním a kontrolou prováděnou člověkem. Dále jsou zde podrobně rozepsány komponenty, ze kterých se optická soustava skládá, a jejich vlastnosti, které je nutné zvážit při návrhu vhodné optické soustavy. První kapitolu uzavírá přehled komunikačních rozhraní, která se používají pro přenos dat mezi kamerou a počítačem.

Druhá kapitola obsahuje popis vzhledu a vlastností bižuterního kamene. Je zde uvedena podrobná charakteristika jednotlivých hrubých vad kamenů, které vznikají při výrobě, a dosavadní kontrola kvality bižuterních kamenů.

Třetí kapitola popisuje základní součásti programovacího prostředí LabVIEW, ve kterém jsou naprogramovány výsledné algoritmy. Další část této kapitoly je věnována jednotlivým komponentám sestavené optické soustavy – kameře, objektivu a osvětlení. Je zde uveden seznam parametrů kamery, které ovlivňují výsledný snímek a které bylo nutné vhodně nastavit. Kapitolu uzavírá podrobný popis algoritmů, pomocí kterých je získán a následně zpracován obraz z kamery.

Čtvrtá kapitola se zabývá optimalizací rychlosti zpracování, popisuje místa v řetězci zpracování obrazu, která jsou problematická, a nabízí řešení této problematiky.

Poslední kapitola obsahuje shrnutí dosažených výsledků a nabytých zkušeností z oblasti snímání a hodnocení bižuterních kamenů.

1 Srovnání kamerových měření a testů s ostatními metodami měření a testování.

1.1 Lidský zrak

Člověk pomocí zraku získává většinu informací ze svého okolí. Poměr takto získaných informací oproti ostatním smyslům se u každého člověka odlišuje, ale obvykle zrak zachytí 80-85 % z celkového množství informací o okolním světě. Z hlediska komplexnosti se oko řadí na druhé místo hned za nejsložitější orgán v lidském těle, a sice mozek. Zhruba polovina našeho mozku se podílí na procesu vidění. [1]

Zdravý člověk je bez problémů schopen určovat tvary a barvy objektů, které jsou přímo před ním nebo které vidí na fotografii či monitoru. Je schopen určit jednotlivé detaily (například okvětní lístky na květině) a odlišit pozadí od viděného objektu. Díky své inteligenci je schopen posuzovat objekty opakovaně a s naprostou samozřejmostí. Vzhledem k nabytým zkušenostem potom dokáže reagovat na nové situace efektivně a volit vhodnou reakci. [2]

1.2 Strojové vidění

Termín strojové vidění (angl. Machine Vision) je označení pro počítačové vidění využívané v průmyslových aplikacích. Jedná se o automatické rozpoznávání a vyhodnocování obrazu získaného z kamery. Podle výsledku tohoto vyhodnocení pak průmyslové systémy vykonávají automatizovanou činnost – vyřazení vadných produktů z výroby, upozornění obsluhy stroje na chybu, kontrola počtu výrobků, úprava nastavení výrobní linky a další [3].

Myšlenkou strojového vidění je nahrazení subjektivního posuzování člověka, eliminace jeho špatných rozhodnutí plynoucích například z nesoustředění, případně vyšší úroveň automatizace výrobního procesu v reálném čase. Zpracování obrazu jako takové může probíhat i „offline“, ale v průmyslu je nutné provádět rozhodování co nejrychleji.

Nejmasivnější nasazení strojového vidění je v současnosti možné spatřovat zejména v oblastech kontroly kvality ve výrobě, automatizaci na kompletačních linkách a v systémech bezpečnosti pro identifikaci osob a vozidel. V blízké budoucnosti se pak očekává (a již i testuje) využití strojového vidění v mikroskopii a zdravotnictví.

1.3 Srovnání lidského oka a kamery

Nabízí se otázka: Proč nenahradit lidský faktor všude, když je strojové vidění (dále jen SV) tak dobré a výhodné? Odpověď je prostá. Se současným výpočetním výkonem toho nelze docílit. Zatím není možné virtualizovat (tzn. virtuálně simulovat na hardwaru počítače) obrovskou komplexnost lidského oka, proto je strojové vidění používáno jen v určitých aplikacích. Mezi hlavní nevýhody SV patří:

- Perspektivní zobrazení původně trojrozměrné scény do dvojrozměrné obrazové roviny

- Komplikovaný a nejednoznačný vztah mezi jasem, který měří kamera, a tvarem povrchu 3D objektů ve scéně
- Veliké množství obrazových dat
- Šum, který je v obraze reálné scény vždy přítomen [2]

Velký objem dat, který se zpracováním obrazu bezpochyby souvisí, je dnes asi nejmenší problém. Přenos obrazu mezi kamerou a hardwarem, který obraz zpracovává (nejčastěji PC), je díky dnešním rozhraním velmi rychlý. Detailněji jsou přenosová rozhraní popsána v kapitole 1.5.

Komplikovaným problémem je perspektiva. Při pohledu kamerou na snímáný objekt se zcela ztrácí informace o jeho reliéfu. Tato situace se dnes řeší použitím více kamer snímajících objekt z více stran a následnou analýzou několika pořízených snímků najednou. Kamery musí být dobře kalibrovány a nastaveny [3].

Současné kamery jsou již natolik výkonné a přesné, že je šum v obraze potlačen při samotném snímání. Nepodaří-li se šum eliminovat přímo na HW kamery, musí se eliminovat softwarově v počítači. Pro tyto případy existuje mnoho matematických algoritmů, které se eliminací šumu zabývají.

Kromě výše popsaných problémů, které souvisí s reprezentací obrazu a jeho přenosem, je nutné brát v úvahu i problémy optické. Tím základním je osvětlení. V drtivé většině případů je potřeba snímáný objekt vhodně nasvítit dodatečným osvětlením, aby vynikly vlastnosti objektu, které chceme detekovat a měřit. Aby kamera snímala stále stejný obraz, je nutné zajistit kontinuální (popřípadě pulzní) zdroj světla o stejné intenzitě a směru.

U intenzity světla není problémem světlo samotné, ale spíše okolní parazitní světlo. Existují dva způsoby, jak se s parazitním světlem vypořádat. Prvním z nich je použití velice intenzivního osvětlení, které přehluší parazitní světlo a eliminuje jeho vliv na vyhodnocení výsledků. Druhým, a častěji používaným způsobem, je mechanické zakrytí celé optické soustavy tak, aby okolní světlo neproniklo na snímáný objekt. Obě varianty mají svá pozitiva a negativa. Hlavním rozhodovacím kritériem je bezpochyby cena, ale i prostor, který je v průmyslovém prostředí k dispozici. Jestliže je snímán malý objekt o velikosti jednotek až desítek centimetrů, vyplatí se nejspíše optickou soustavu zakrýt. Naopak je-li zkoumaný objekt velký v řádu metrů, je nutné uvažovat, zda se ještě vyplatí stavět kolem soustavy zábrany nebo použít silnější osvětlení.

Další vlastností světla, kterou je nutné se zabývat, je směr a úhel nasvícení. Aby bylo zajištěno dosažení stále stejných výsledků, musí být i tyto parametry neměnné. Toho lze docílit vhodným fixním umístěním a nasměrováním světla za předpokladu, že výrobek bude vždy v určité pozici nebo oblasti. Tímto ale otázka osvětlení nekončí. Podle typu aplikace je totiž nutné také použít vhodný typ osvětlení (viz Kapitola 1.4.4).

Téměř všechny problémy, které jsou v této kapitole popsány, nejsou pro člověka příliš podstatné. Lidé potřebují mít scénu dostatečně osvětlenou, ale není pro ně důležité, z jakého směru světlo svítí nebo jakou má vlnovou délku (barvu). Díky své komplexnosti si člověk

poradí i s horším osvětlením a především vnímá obraz ve 3 rozměrech. Je-li navíc něco vidět špatně z přímého úhlu, může se člověk podívat z jiné strany nebo si výrobek natočit tak, aby lépe viděl, což statická kamera nemůže.

Proč tedy strojové vidění? Pokud se vyřeší problémy a vhodně navrhne celá optická soustava, jsou kamera a algoritmy vyhodnocení obrovským pomocníkem, který šetří prostředky a čas. Kamera může fungovat v provozu nepřetržitě, obraz bude snímán stále stejně, takže i vyhodnocení v počítači bude dosahovat stále stejných výsledků. Potřebný čas na sejmутí obrazu a jeho vyhodnocení je v řádu desítek až stovek milisekund, s dostatečně rychlou kamerou a stálým přísunem výrobků je tak možné kontrolovat desítky objektů během jediné vteřiny. S touto rychlostí se člověk nemůže rovnat [3].

Cílem ale není člověka nahradit úplně. Stroj je stále jen jeho pomocníkem. Tím, že se pracovník nemusí zabývat například neustálým měřením rozměrů výrobku, což je hlavně velmi psychicky náročné, může se specializovat na složitější úkony nebo na obsluhu PC se spuštěným rozhodovacím algoritmem. Díky tomu, že měření provádí kalibrovaný stroj, který má přesnost desetiny milimetru, je rozhodování o kvalitě výrobků mnohem přesnější a nedochází k omylům jako u člověka, které vyplývají například z únavy.

1.4 Optická soustava

V předchozí kapitole bylo často zmíněno slovní spojení „optická soustava“. Jedná se o vhodně sestavený fungující celek složený z následujících komponent – kamera, objektiv, filtr, osvětlení a snímáný objekt.

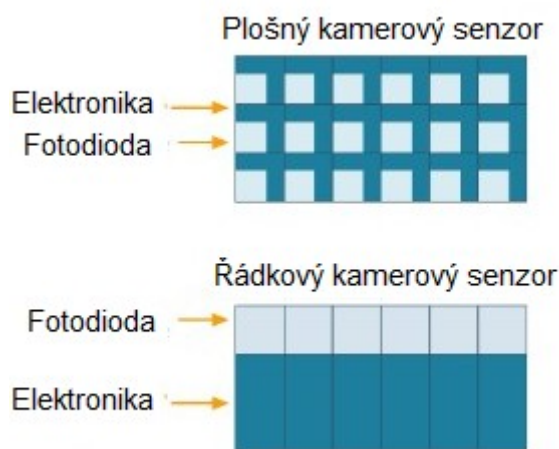
1.4.1 Kamera

Nejprve je nutné vybrat kameru, která bude vhodná pro budoucí aplikaci. Od tohoto výběru se pak odvíjí výběr ostatních komponent.

Nejdříve je třeba si uvědomit, jaký typ kamery budeme potřebovat. Na výběr je k dispozici barevná nebo monochromatická kamera. V průmyslových aplikacích se většinou používá kamera černobílá. Důvodem je například menší objem dat, který se přenáší. Jeden pixel černobílé kamery je zakódován do 8 bitů, jelikož je definován jako jedna hodnota šedé ze škály 256 hodnot. Barevná kamera přenáší o jednom pixelu informaci zabírající 32 bitů. Osm bitů pro každou z barevných složek (červenou, zelenou a modrou) a zbývajících 8 bitů pro alfa kanál. Pixel znamená obrazový bod, což je nejmenší jednotka obrazu. Dalším důvodem je fakt, že při zpracování obrazu v počítači se většinou pracuje výhradně v odstínech šedi. Nadbytečné informace o barvách jsou často nakonec potlačeny [4].

Nyní je třeba se rozhodnout, zda zvolit kameru plošnou (area scan) nebo řádkovou (line scan). Plošná kamera je klasická kamera s obdélníkovým snímacím čipem, která snímá obraz stejně jako fotoaparát. Tento typ kamery se používá v případě, že se snímáný objekt nepohybuje vůbec nebo velmi malou rychlostí. Pokud by přeci jen bylo nutné snímat pohybující se předměty, musel by být na kameře nastaven velmi krátký expoziční čas v kombinaci s velmi intenzívním zábleskovým světlem, aby nedošlo k rozmazání nebo deformaci obrazu vlivem

pohybu snímaného předmětu. Pro aplikace, ve kterých se snímaný objekt pohybuje, se proto častěji používají řádkové (lineární) kamery. Řádková kamera obsahuje snímač, který má jeden jediný řádek obrazových bodů (pixelů). Pod kamerou se konstantní rychlostí pohybuje snímaný objekt. Kamera jej snímá po jednotlivých řádcích a skládá dohromady obraz, který posílá do počítače. Lineární snímač (řádkový senzor) je až několikanásobně citlivější ve srovnání s plošným senzorem. Proto může kamera snímat s velmi krátkým expozičním časem vysokou rychlostí v řádu desítek tisíc řádků za sekundu. Důvod vyšší citlivosti řádkové kamery je zřejmý z obrázku 1.1. Zatímco u plošného senzoru zaujímá část plochy pixelu zpracovávající elektronika, u lineárního senzoru je celá plocha pixelu vyhrazena pro světlocitlivou buňku (fotodiodu) a elektronika je umístěna vedle. Proto má řádková kamera až 2x vyšší citlivost oproti klasické kameře při stejné velikosti pixelu. [5]



Obrázek 1.1: Porovnání senzoru plošné a řádkové kamery [5]

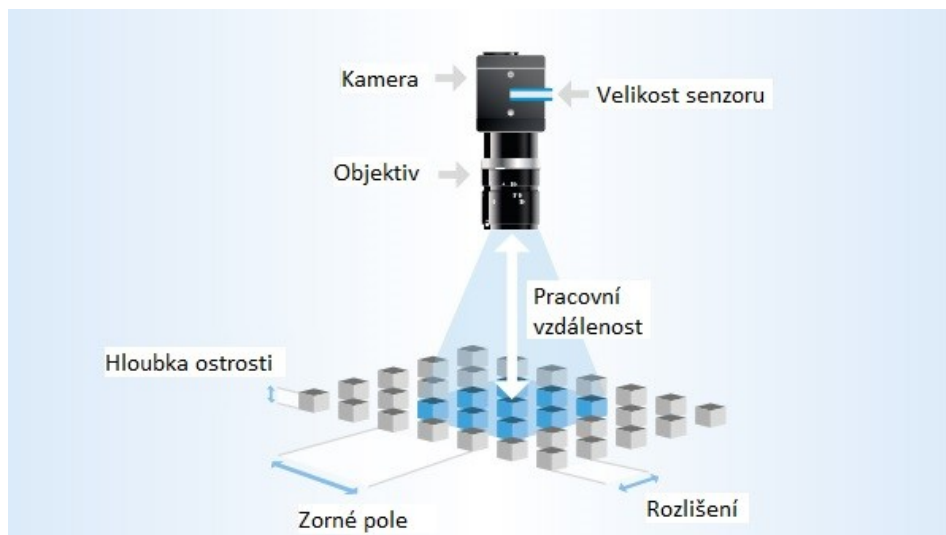
Dalším kritériem pro výběr kamery je rozlišení. Rozlišení kamery je údaj, který představuje počet pixelů na senzoru. U kamer s plošným senzorem je udáván počet pixelů na výšku i šířku senzoru. U řádkových kamer je udávána pouze šířka senzoru, jelikož mají pouze jeden řádek pixelů. S tím souvisí další výhoda řádkových kamer, a tou je teoreticky nekonečně dlouhý obraz. Samozřejmě platí fakt, čím větší rozlišení, tím větší plochu můžeme nasnímat, ale zároveň je potřeba zpracovat větší množství dat.

S počtem pixelů na senzoru souvisí také citlivost kamery. Jelikož nelze senzor do nekonečna zvětšovat, zmenšují se pixely na něm. Tím klesá jejich citlivost a je potřeba pak počítat s nutností intenzivnějšího osvětlení.

Posledním důležitým kritériem z hlediska zpracování obrazu je frekvence kamery. Tento parametr se jmenuje „*frames per second*“ („*lines per second*“ u řádkové kamery) a představuje počet snímků za vteřinu (počet řádků za vteřinu), které je kamera schopna nasnímat při svém plném rozlišení. Snížením vertikálního rozlišení (počet řádků pixelů v obraze) lze dosáhnout větší snímkovací frekvence. Snížení horizontálního rozlišení (počet sloupců pixelů v obraze) nemá na snímací frekvenci vliv.

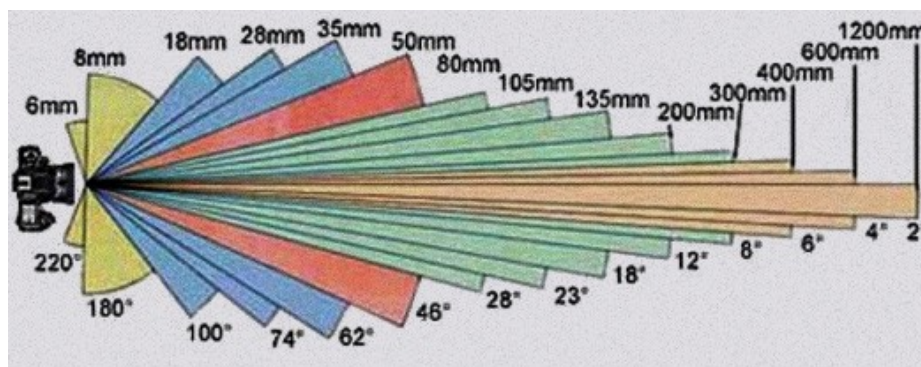
1.4.2 Objektiv

Následujícím krokem pro úspěšné navržení optické soustavy je výběr vhodného objektivu. Objektiv je soustava čoček, která se používá k soustředění světla na čip kamery. Před popisem běžně používaných typů objektivů ve strojovém vidění si je třeba ujasnit několik pojmů, které se v souvislosti s objektivy používají. Tyto pojmy jsou – ohnisková vzdálenost, pracovní vzdálenost, hloubka ostrosti a zorné pole (viz obrázek 1.2).



Obrázek 1.2: Parametry objektivu [6]

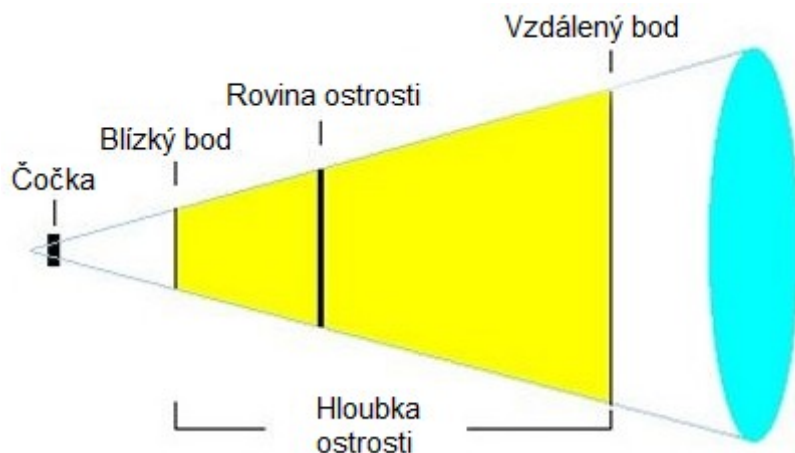
Ohnisková vzdálenost (Focal length) je vzdálenost mezi středem čočky a rovinou (senzorem), na kterou jsou zaostřeny objektivem soustředěné paprsky. Čím menší je ohnisková vzdálenost, tím širší je zorný úhel, tedy větší je zorné pole (viz obrázek 1.3).



Obrázek 1.3: Ohniskové vzdálenosti s příslušným zorným úhlem [6]

Pracovní vzdálenost (WD – Working Distance) je vzdálenost mezi čelem čočky objektivu a snímaného objektu. Čím větší je zvětšení objektivu, tím kratší je jeho pracovní vzdálenost [7]. Pokud je dosaženo předepsané pracovní vzdálenosti pro daný typ objektivu, bude v tomto místě objekt nejvíce ostrý (bude dosaženo roviny ostrosti).

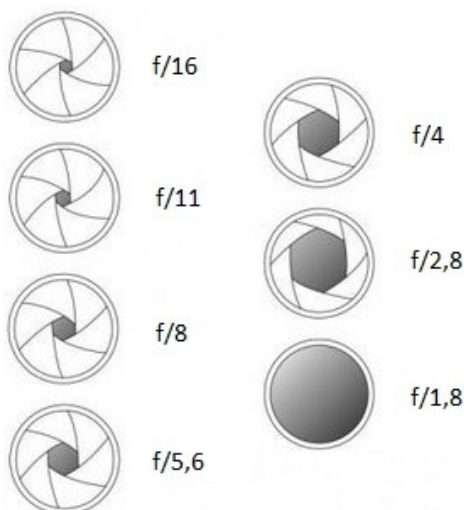
Hloubka ostrosti (DOF – Depth Of Field) je rozmezí mezi nejvzdálenějším a nejbližším bodem, které jsou na snímku vidět s přijatelnou ostrostí. Tento parametr určuje, o kolik je možné se posunout blíže či dále od objektivu vůči rovině ostrosti (viz obrázek 1.4). Hloubka ostrosti bývá v poměru 1/3 před a 2/3 za nejostřejším bodem snímané scény. [8]



Obrázek 1.4: Znázornění hloubky ostrosti objektivu [9]

Zorné pole (FOV – Field Of View) je oblast, kterou je daná optická soustava schopna nasnímat. Zorné pole je ovlivněno jak ohniskovou vzdáleností objektivu, tak i velikostí senzoru kamery. Pokud má kamera malý senzor, tak ani sebevětší objektiv nedokáže zvýšit FOV.

Nedílnou a důležitou součástí objektivu je clonový kroužek. Ten umožňuje měnit množství světla, které projde skrz objektiv. Skládá se z několika lamel, které se pohybem prstence otevírají a zavírají, čímž je ovlivněna velikost otvoru pro světlo (viz obrázek 1.5). Pomocí clony lze ovlivnit hloubku ostrosti. Čím více je clona přivřena (zvýšíme clonové číslo f), tím je dosaženo větší hloubky ostrosti. Clonové číslo f představuje poměr mezi ohniskovou vzdáleností optické soustavy a průměru vstupní čočky.



Obrázek 1.5: Stupně clony s příslušným clonovým číslem

Klasické objektivy obsahují 2 pohyblivé kroužky: jedná se o ostřicí kroužek, kterým se doostřuje scéna, a clonový kroužek, kterým se nastavuje clonové číslo. Existují však i objektivy, které mají kroužky tři. Tím třetím je kroužek ovlivňující ohniskovou vzdálenost. Tyto objektivy se nazývají „*Objektivy s proměnnou ohniskovou vzdáleností*“ nebo také přeneseně „*Zoom objektivy*“. Točením kroužku lze zvětšit či zmenšit ohnisko, což se na obraze projeví jako přiblížení nebo oddálení (proto označení Zoom objektivy). Tento typ objektivů se ve strojovém vidění příliš nepoužívá. Je to především z toho důvodu, že optická soustava bývá uzavřena ve stroji nebo je přesně kalibrována, a jakýkoli zásah do mechanických nebo optických parametrů této soustavy by mohl znamenat špatné vyhodnocování výsledků. Tím odpadá potřeba a možnost dodatečně „zoomovat“ na objekt.

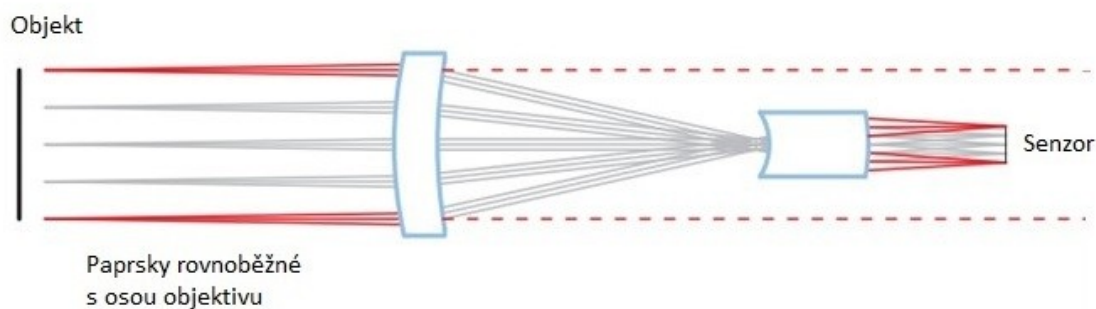
Objektivy lze rozdělit do několika kategorií podle svých vlastností. Ve strojovém vidění se používají především

- širokoúhlé objektivy
- telecentrické (bitelecentrické) objektivy
- makroobjektivy.

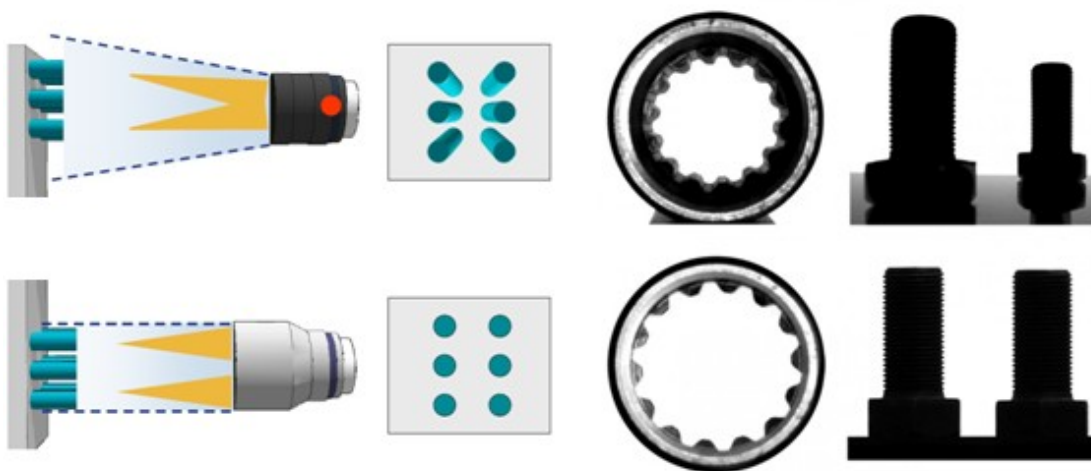
Širokoúhlé objektivy jsou klasické čočky, které se používají například při fotografování. Telecentrický objektiv je takový, kterým projdou pouze paprsky, jenž jsou rovnoběžné s osou objektivu. Makroobjektiv má tu vlastnost, že na senzor kamery vykresluje objekt v reálných jednotkách, viz níže.

Výběr vhodného objektivu závisí nejen na aplikaci a velikosti senzoru kamery, ale také na rozlišení. Existují totiž širokoúhlé megapixelové, 5-ti megapixelové a 10-ti megapixelové objektivy. Nejběžněji se používají megapixelové objektivy, které kvalitně vykreslí obraz na čip kamery s až 2 megapixelovým rozlišením. Pro kamery s vyšším rozlišením se používají zmiňované kvalitnější objektivy. Při použití megapixelového objektivu na 5-ti megapixelové kameře bude obraz na krajích velmi zkreslen a rozostřen, což je samozřejmě nežádoucí. Další typickou vlastností těchto objektivů (na rozdíl od telecentrických) je, že při oddalování objektu od objektivu se zmenšuje jeho obraz. Jedná se o jev, který je přirozený i pro lidské oko. Širokoúhlé objektivy se používají v aplikacích typu detekce vad na povrchu, ověření přítomnosti komponent a čtení čárových a jiných kódů.

U telecentrických (TC) objektivů a makroobjektivů se vybírá spíše podle velikosti zorného pole než podle rozlišení kamery. Základní vlastností TC objektivů je schopnost zobrazovat předměty s konstantním zvětšením nezávisle na vzdálenosti od objektivu. Hlavní světelné paprsky putují do objektivu rovnoběžně s jeho osou, což eliminuje perspektivu a zvyšuje přesnost zobrazení [10] (viz obrázek 1.6). Nedochází tedy ke zkreslení obrazu směrem ke kraji jako u širokoúhlých. Vzhledem k této výhodné vlastnosti se TC objektivy používají především na velmi přesná měření, detekci hran objektu za pomoci zadního TC osvětlovače a kontrolu vývodů elektronických součástek a konektorů (viz obrázek 1.7).



Obrázek 1.6: Světelné paprsky, které prochází TC objektivem [11]

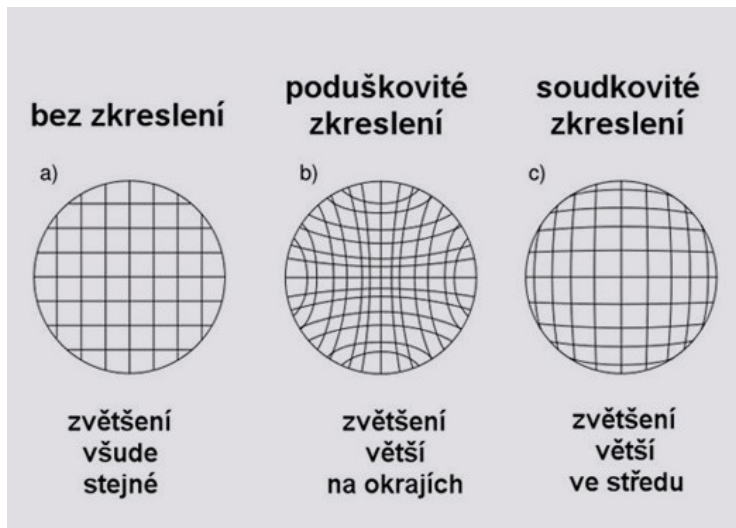


Obrázek 1.7: Srovnání širokoúhlého (nahore) a TC objektivu [11][12]

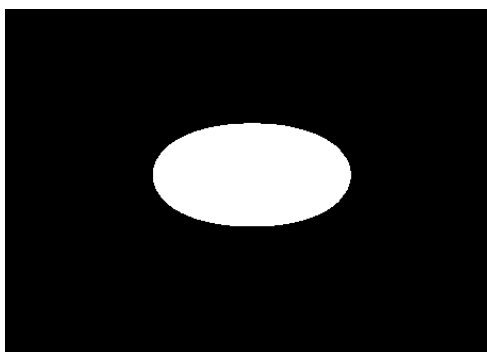
Makroobjektivy jsou speciální typ objektivu, který se používá pro snímání velmi drobných předmětů. Jejich hlavními výhodami je velmi malé až žádné zkreslení a velmi dobré rozlišení. Zorné pole bývá opravdu malé (jednotky mm), ale některé typy makroobjektivů mohou dnes poskytovat několikanásobné zvětšení snímaného obrazu. Důvod, proč se tyto objektivy používají pro velmi drobné objekty, je ten, že dokážou vykreslit jeho reálnou velikost na senzor. To znamená, že při snímání objektu, který je velký 3x3 mm, zabere tento objekt na čipu plochu 3x3 mm (v případě nulového zvětšení). Z toho vyplývá, že zorné pole závisí na velikosti senzoru kamery a zvětšení objektivu. Užití těchto objektivů je v aplikacích, které mají za úkol snímat a analyzovat velmi malé součásti. Ideální použití je například pro kontrolu plošných spojů a ostatních drobných elektronických součástek.

Ve strojovém vidění se u objektivů lze nejčastěji setkat se dvěma typy vad. První vadou je zkreslení, které je dáno výrobní konstrukcí objektivu. Rozlišují se dva typy zkreslení – soudkovité a poduškovité. U průmyslových objektivů se objevuje pouze soudkovité zkreslení, kdy oblast uprostřed objektivu je nasnímána korektně, ale směrem ke kraji dochází ke zmenšování (viz obrázek 1.8).

Druhou vadou je vinětace. Vinětace je rovnoměrný úbytek světla směrem od středu obrazu ke krajům (viz obrázek 1.9). Nejvíce se projevuje při zcela odcloněném objektivu. Při postupném zvyšování clonového čísla se bude tato vada do určitého bodu zmírňovat [8]. Obě vady se projevují jen u prvního typu zmiňovaných objektivů – širokoúhlého.



Obrázek 1.8: Druhy zkreslení širokoúhlého objektivu [13]



Obrázek 1.9: Vinětace širokoúhlého objektivu[14]

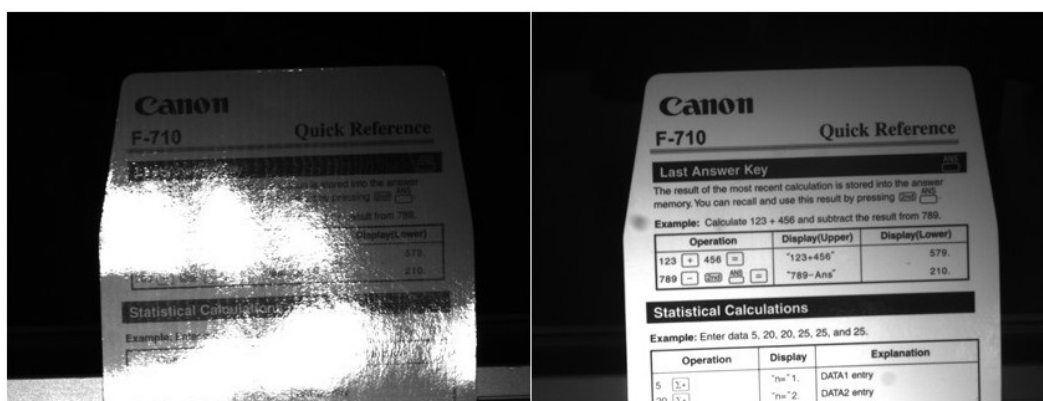
1.4.3 Filtry

Filtry jsou pasivní optické součásti, které se v naprosté většině vkládají na konec celé optické soustavy – na objektiv. Filtr je opatřen závitem, pomocí kterého je našroubován na objektiv. Některé objektivy (telecentrické a makro) však takový závit na sobě nemají. Důvodem je velikost čela objektivu. Makroobjektivy jsou příliš malé pro klasické filtry. Telecentrické mají naopak proměnlivou velikost, která dosahuje od jednotek až po desítky centimetrů. Jak tento problém vyřešit? Obecně lze použít řešení dvě, ale ve strojovém vidění se používá pouze jedno. Je to prosté – filtr se umístí až těsně za objektiv, přesněji řečeno do jeho ústí. Druhým způsobem, kterým je možné filtrovat dopadající světlo, je umístit filtr před objektiv a upevnit ho pomocí adaptérů. Vzhledem k pracovním podmínkám v provozu (prach, vibrace, mechanické namáhání, atd.) je ale každá další část optické soustavy, která není

umístěna pevně, problémem, který může za určitý čas ovlivnit výsledky inspekce. Proto se tento typ uchycení filtru nepoužívá vůbec nebo jen ve speciálních případech.

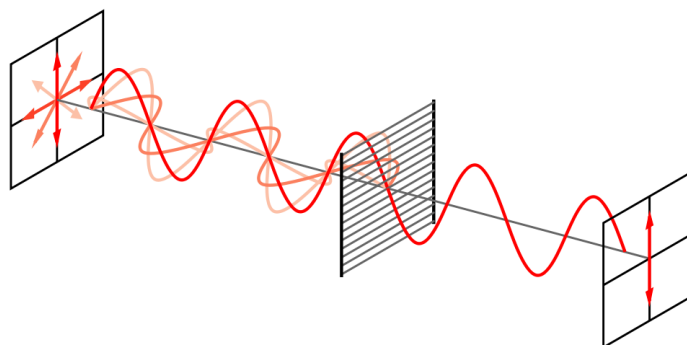
Ve strojovém vidění se používá široká škála filtrů, které různými způsoby ovlivňují světlo dopadající na senzor kamery. Vše závisí na aplikaci, kterou je třeba vytvořit. Některé typy se však používají častěji než ostatní. Těchto několik filtrů je podrobněji popsáno níže.

Nejpoužívanějším filtrem je **filtr polarizační**. Objekty nebo jejich části, které je potřeba nasnímat, jsou často lesklé, a proto odráží do kamery větší množství světla, než je nutné. Tyto odlesky jsou nežádoucí a narušovaly by inspekci výrobku. Použitím polarizačního filtru lze takové odlesky eliminovat z části nebo dokonce úplně (viz obrázek 1.10).



Obrázek 1.10: Ukázka eliminace odlesku použitím polarizačního filtru [15]

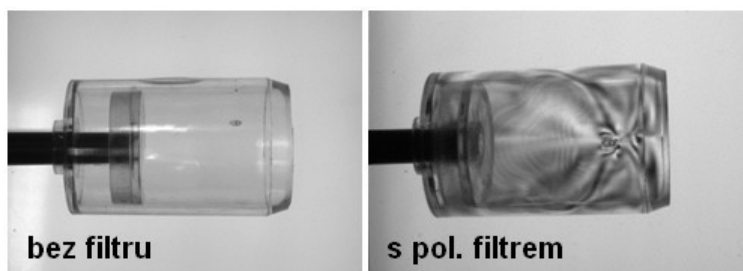
Při použití přídavného osvětlení ale jenom jeden filtr nestačí. Je potřeba polarizovat i zdroj světla. Princip polarizačního filtru je následující. Světlo je elektromagnetické záření, které kmitá ve všech směrech. Polarizační filtr ale propouští pouze světlo, které kmitá v jednom směru [16] (viz obrázek 1.11).



Obrázek 1.11: Princip polarizace světla [17]

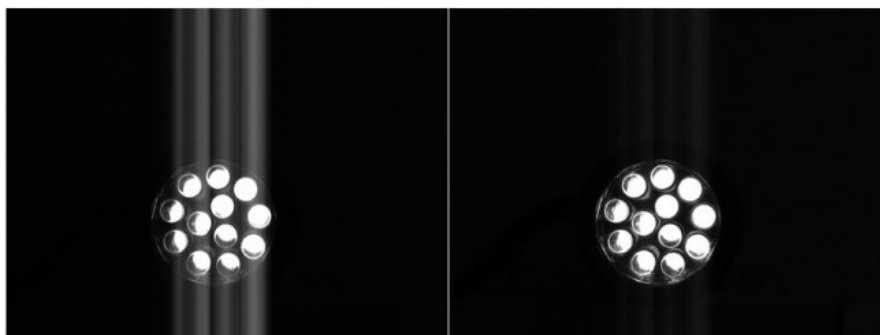
Filtr je konstruován tak, že se jím může otáčet, a tím lze volit, který směr světla bude propuštěn. Pokud je filtr aplikován i na zdroji světla, je už výstupní svazek polarizován do jednoho směru. Bude-li filtr otočen na objektivu tak, že polarizační rovina bude kolmá na rovinu filtru na světle, neprojde na senzor kamery žádné světlo. Kromě eliminace odlesků se tento filtr používá pro kontrolu pnutí ve skle nebo průhledném plastu. Sklem nebo plastem se

nechá procházet polarizované světlo (nejčastěji pomocí zadního osvětlení s polarizační fólií) a na kameru je připevněn druhý polarizační filtr, jehož polarizační rovina je souhlasná s rovinou fólie na osvětlení. Při výstupu z osvětlení je tedy světlo polarizováno jedním směrem. Místa s vnitřním napětím ve skle ale polarizační rovinu stáčí, takže z materiálu vychází světlo s různě stočenou rovinou polarizace. Tím, že je na kameře polarizační filtr, lze tato místa zobrazit. Tam, kde nedochází k vnitřnímu pnutí, zůstane materiál průhledný. Místa, kde došlo ke změně úhlu polarizace, se však jeví jako tmavá (viz obrázek 1.12). Při použití barevné kamery se tato vada projevuje jako duhové přechody. Čím více je těchto přechodů na snímku, tím větší je vnitřní napětí v materiálu. [15]



Obrázek 1.12: Ukázka pnutí v plastu [15]

Další kategorií jsou **filtry šedé** (nebo také neutrální). Tyto filtry se používají pro rovnoměrné snížení propustnosti světla v celém viditelném spektru. Snižují jas obrazu, aniž by ovlivňovaly hloubku ostrosti. Používají se k řízení intenzity světla, které projde skrz objektiv k snímáči tak, aby tento senzor nebyl přesaturován, tedy aby jasová hodnota pixelu nepřesáhla jeho možnosti (viz obrázek 1.13). Neobvykle intenzivní světlo může totiž senzor dokonce poškodit. Filtry se vyrábějí s různou optickou hustotou, takže volbou filtru lze ovlivnit, jak moc bude světlo pohlceno (viz obrázek 1.14). [18]

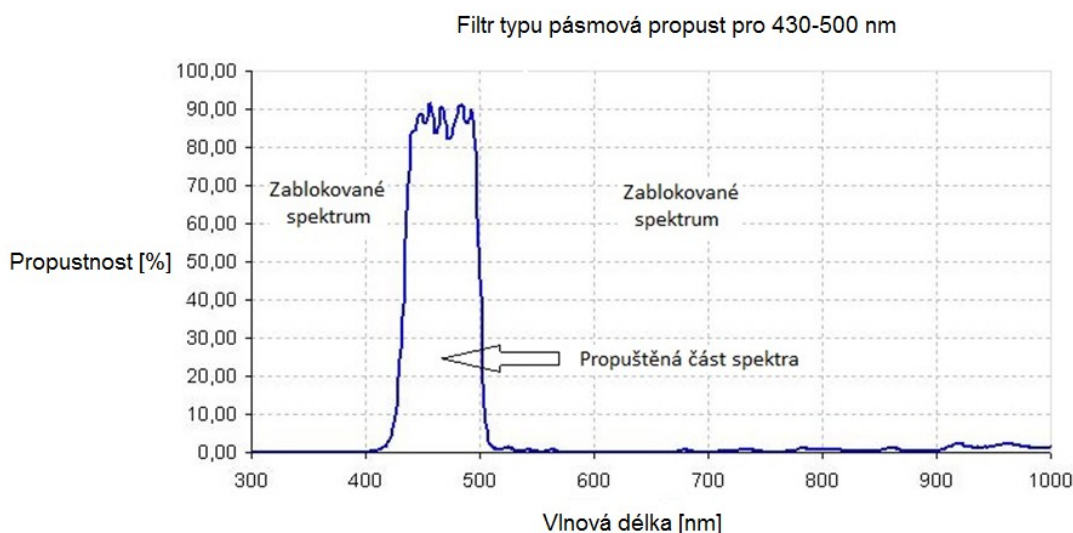


Obrázek 1.13: Řízení intenzity světla pomocí šedého filtru (vpravo snímek s filtrem) [18]



Obrázek 1.14: Šedé filtry s různou optickou hustotou [18]

Poslední kategorie obsahuje několik typů filtrů. Jedná se o **dolní** (Shortpass), **pásmovou** (Bandpass) a **horní propust** (Longpass). Filtry typu horní propust jsou vyrobeny tak, aby světlo, které má vlnovou délku větší než je vlnová délka hraniční, bylo propuštěno. Filtr typu dolní propust jsou přesným opakem. Ty propouští světlo o vlnové délce, která je menší než definovaná hraniční vlnová délka. Kombinací těchto dvou filtrů vzniká pásmová propust. Tento typ filtrů propouští světlo v určitém pásmu omezeném dvěma vlnovými délkami (viz obrázek 1.15).



Obrázek 1.15: Princip fungování optického filtru typu pásmová propust [19]

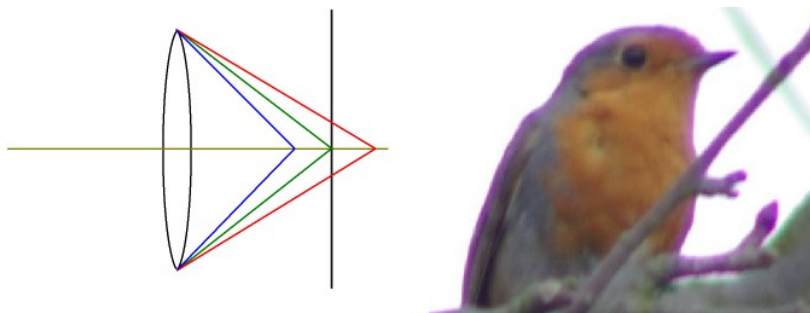
Speciální kategorií jsou barevné filtry. Z hlediska výroby se jedná buď o pásmovou propust, nebo horní propust. Modrý a zelený filtr jsou pásmové propusti. Propouštějí pouze světlo o vlnové délce odpovídající barvy z pohledu lidského oka. Naopak žlutý, oranžový a červený jsou filtry propouštějící vlnové délky dané barvy a větší. Barevné filtry jsou absorpční filtry, které se používají hlavně ke zvýšení kontrastu černobílého snímku. [20]

Ve strojovém vidění se v některých případech používají ultrafialová a infračervená světla. Aby účinek těchto světél byl co největší, byly vyvinuty filtry, které propouští pouze světlo o těchto vlnových délkách. Obecně se nazývají IR-pass a UV-pass.

1.4.4 Osvětlení

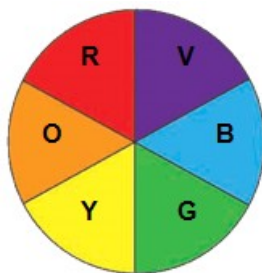
Poslední, ale neméně důležitou, kategorií je osvětlení. Současný trh světelných zdrojů pro strojové vidění se vyčlenil do několika kategorií, které vám blíže popíši. Každá kategorie je vhodná pro jiný typ objektu, který je potřeba kontrolovat, a má své typické vlastnosti. Při výběru takovéto kategorie je nutné zvážit mimo jiné i vlastnosti zkoumaného objektu. Jedná se především o jeho velikost, typ povrchu, barvu povrchu a reliéf. Typem povrchu je myšleno, zda je objekt lesklý, matný nebo strukturovaný. Při zkoumání reliéfu povrchu je zase nutné brát v úvahu, jak moc je povrch členitý, čímž může vytvářet stíny. Barva povrchu je důležitá kvůli absorpci světla. Pokud je vybráno vhodné osvětlení, které splňuje uvedené podmínky, lze dosáhnout maximalizace kontrastu v objektu, což je primární úkol dodatečného osvětlení.

Barva osvětlení je důležitá ještě z jednoho hlediska, a tím je vliv různých vlnových délek na zaostření objektu. Širokospektrální (bílý nebo vícebarevný) zdroj světla je vhodnější především pro barevné kamery. Detekce barev se totiž více blíží přirozenému vnímání lidským okem. Jeho nevýhodou je vznik barevné vady optiky způsobené rozdílným indexem lomu pro jednotlivé vlnové délky světla. Jedná se o tzv. chromatickou aberaci (viz obrázek 1.16) [21].

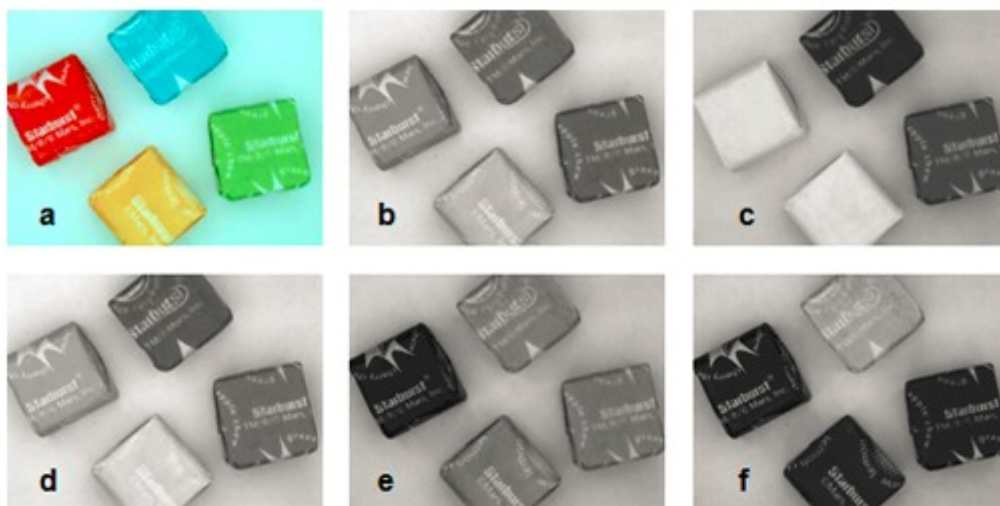


Obrázek 1.16: Důvod a důsledek aberace [21]

Monochromatické světlo sice způsobí, že barvy nejsou zobrazeny věrohodně, ale jeho nespornou výhodou je zvýšení kontrastu v obraze. Taktéž je eliminována chromatická aberace, jelikož objektivem prochází pouze úzké pásmo vlnových délek. Samotná barva osvětlení je pak povrchem absorbována nebo odražena (viz Obrázky 1.17 a 1.18).



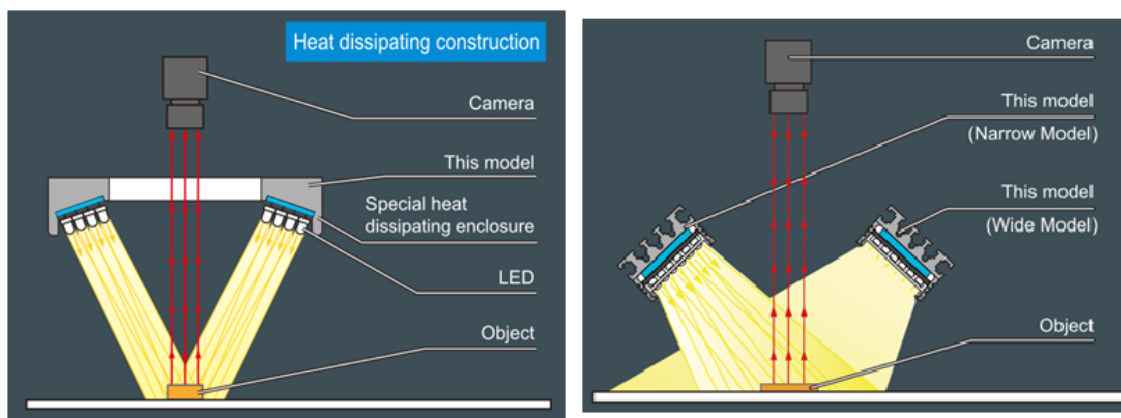
Obrázek 1.17: Rozložení barev – protilehlé barvy se navzájem absorbují [22]



Obrázek 1.18: Ukázka absorpce na reálných různobarevných objektech (a – originální obraz, b – bílé světlo, c – červené světlo, d – červené a zelené světlo, e – zelené světlo, f – modré světlo) [22]

Všechny kategorie světél, které jsou v této kapitole popsány, se vyrábějí v několika různých velikostech od opravdu malých, řádově desítky milimetrů velkých světél, až po metrová světla.

Světlo typu **jasné pole (Bright Field)** patří mezi nejhojněji využívaná osvětlení. Nejčastěji se vyrábí ve formě kruhového světla (ring light), čtvercového světla (square light) a podélného světla (flat light). Umisťuje se vždy nad zkoumaný objekt a většinou blíže k objektivu (kolem něj) než k samotnému objektu (viz obrázek 1.19).

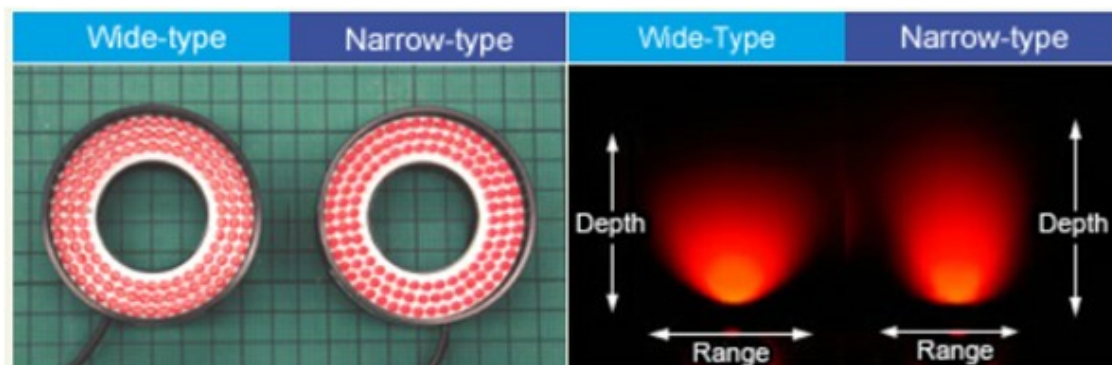


Obrázek 1.19: Model použití světél typu jasné pole [23][24]

Jasné pole je možné dále dělit podle úhlu, pod kterým je světlo emitováno. Jedná se buď o úzký úhel (narrow angle) nebo široký úhel (wide angle). Primární výhody plynou z názvu. Osvětlení s úzkým úhlem vyzařování poskytuje intenzivnější užší světlený svazek, a je proto možné svítit na objekty z větší vzdálenosti. Osvětlení s širokým úhlem vyzařování zase

poskytuje homogennější osvětlení povrchu, větší ozářenou plochu a jsou vhodné pro použití s difuzorem (viz obrázek 1.20).

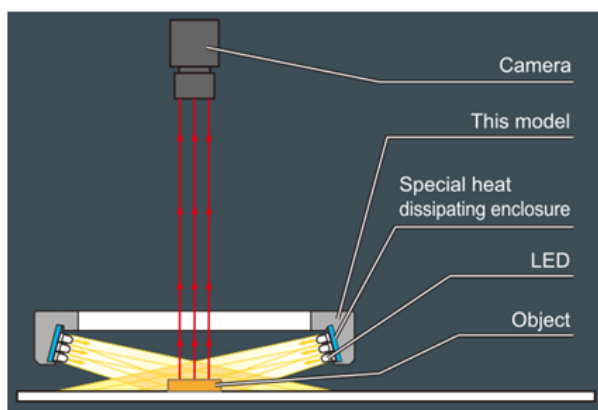
Jasně pole se používá především pro nasvícení matného povrchu. Vzhledem k vyzařované intenzitě světla se dále používá v aplikacích, kde se objekty pohybují rychle, a je proto nutné pracovat s krátkou expoziční dobou.



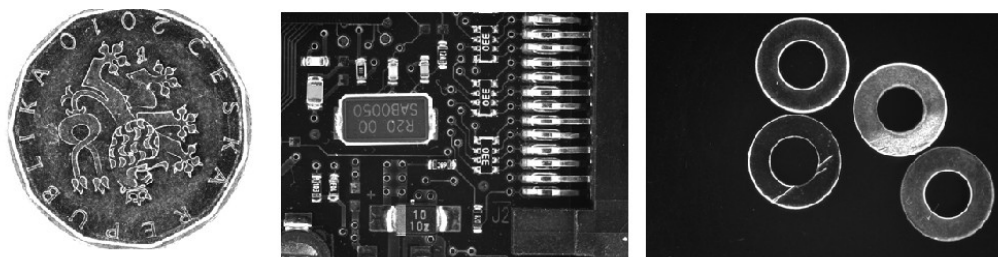
Obrázek 1.20: Srovnání světel s širokým a úzkým úhlem vyzařování [22]

Světlo typu **temné pole (Dark Field)** je v podstatě speciální případ jasněho pole. Jedná se rovněž o osvětlení, které se umísťuje nad objekt, ale vzhledem k velmi velkému úhlu vyzařování jen několik milimetrů nad něj (viz obrázek 1.21).

Tento typ osvětlení se používá především pro zvýraznění reliéfu, inspekci desek s plošnými spoji a povrchové vady výrobku jako jsou škrábance a podobně (viz obrázek 1.22).



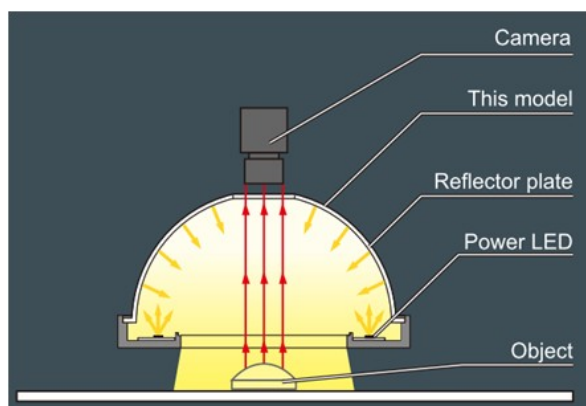
Obrázek 1.21: Model použití osvětlení typu temné pole [25]



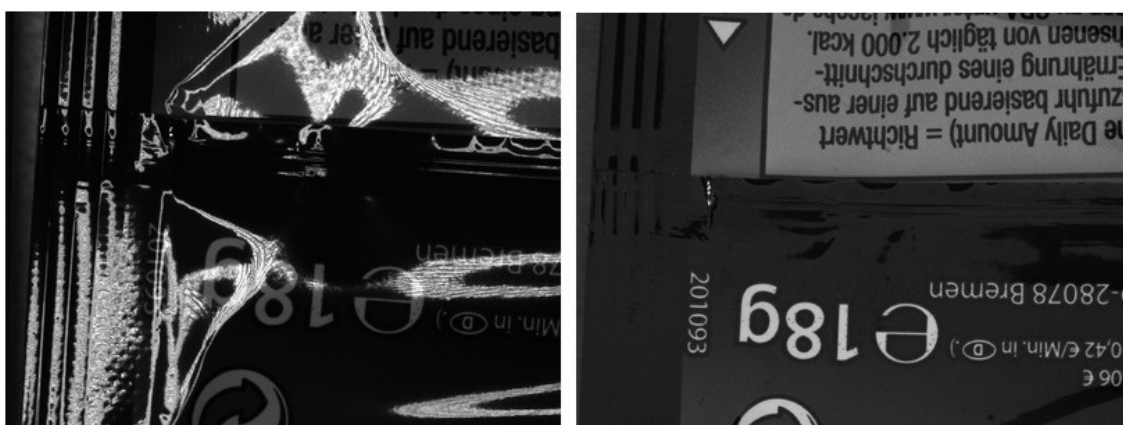
Obrázek 1.22: Ukázky aplikací pro světlo typu temné pole[22]

Dalším typem osvětlení je **kopulové difúzní světlo (Dome Light)**. Toto světlo vyzařuje velmi intenzivně a především uniformně. Je to dáno jeho konstrukcí. Jedná se o kopuli s otvorem pro kameru v nejvyšším bodě. LED diody jsou umístěny ve spodní části a svítí do vnitřní části kopule, která poté odráží již difúzní světlo na objekt pod všemi úhly (viz obrázek 1.23). Světlo se umísťuje těsně k objektivu, ale zároveň nesmí být příliš vzdáleno od objektu.

Nejčastěji se používá pro snímání lesklých předmětů a obalových materiálů (viz obrázek 1.24).

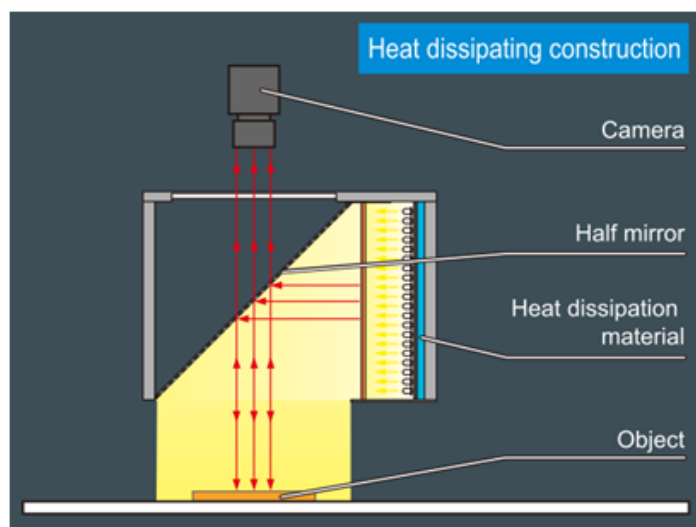


Obrázek 1.23: Model použití kopulového difúzního světla [26]

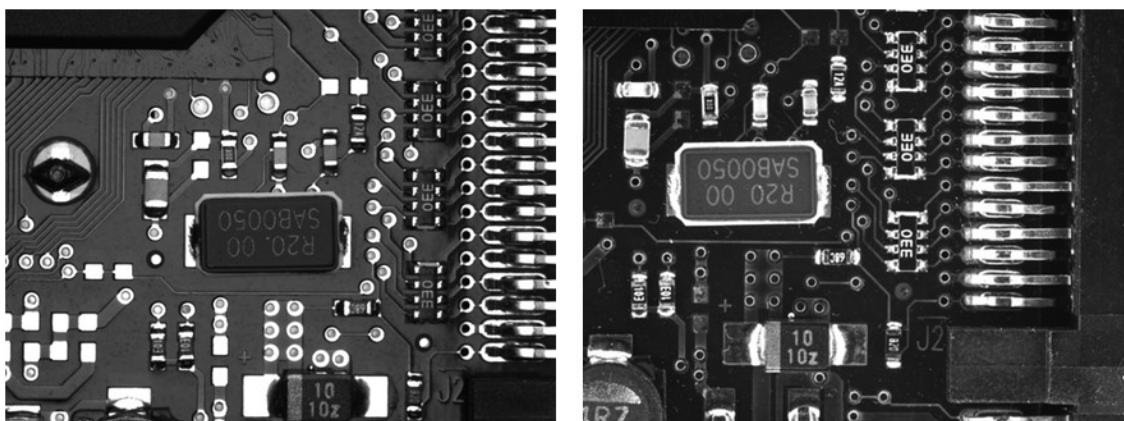


Obrázek 1.24: Objekt snímáný světlem typu jasné pole (vlevo) a kopulovým světlem [22]

Posledním typem přímého nasvícení je **koaxiální osvětlení (Diffused On Axis Light)**. Toto osvětlení je speciální svou stavbou. Světlo je emitováno zboku a přes polopropustné zrcadlo je odraženo v ose kamery na objekt (viz obrázek 1.25). Světlo je umístěno co nejbližše objektivu a kamera snímá objekt skrz polopropustné zrcadlo. Výsledkem je obraz, ve kterém jsou lesklé plochy, které jsou kolmé na osu objektivu, jasně ozářené a všechny ostatní jsou na snímku tmavé. Díky této vlastnosti je světlo vhodné na detekci defektů v ploše. Dále se koaxiální světlo používá pro inspekci desek plošných spojů, reliéfu, vyražených nebo vytištěných nápisů a kontrolu pinů v konektorech. Koaxiální světlo je inverzní k temnému poli (viz obrázek 1.26) a jeho výhodné vlastnosti jsou ještě umocněny při použití v kombinaci s telecentrickým objektivem.

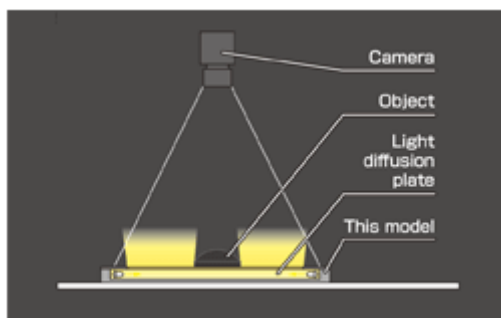


Obrázek 1.25: Model použití koaxiálního osvětlení [27]



Obrázek 1.26: Deska plošných spojů nasvětlená koaxiálním světlem (vlevo) a temným polem (vpravo) [22]

Existuje ještě jeden typ osvětlení, který se však neumísťuje nad objekt, ale naopak z jeho zadní strany. Jedná se o **zadní nasvícení (Back light)**. Používá se pro průsvit objektu, nebo při měření rozměrů a kontur objektu (viz obrázek 1.27).



Obrázek 1.27: Model použití zadního nasvícení [28]

1.5 Přehled kamerových komunikačních rozhraní

Tato kapitola pojednává o komunikačních rozhraních, které se ve strojovém vidění nejčastěji používají. Každý typ má své výhody a nevýhody. Některý se již dnes používá velmi málo a jiný naopak vytlačuje ostatní a stává se čím dál více používaný. Výběr správného rozhraní ovlivňuje výsledný výkon, spolehlivost a cenu celého systému.

GenICam je světově rozšířený standard, který definuje, jak ovládat digitální kamery a jiné systémy, které mohou přenášet obrazové informace. Na jeho vývoji se podílelo 13 firem, mezi které patří i National Instruments, Basler AG a Pleora Technologies. Poskytuje stejné rozhraní, které lze využít pro tvorbu aplikací, pro všechny kamery, které tento standard podporují bez ohledu na výrobce, mechaniku kamery nebo použitého komunikačního rozhraní. Ze standardu GenICam vychází široká škála vysokorychlostních video standardů, mezi které patří i GigE Vision®, USB3 Vision™ a Camera Link®. O rozhraních, která využívají tyto standardy, a o několika dalších pojednávají následující podkapitoly. GenICam se skládá ze čtyř částí [29]:

- GenApi – Definiuje formát a strukturu XML souboru a specifikuje, jak ovládat a přistupovat k jednotlivým funkcím kamery (zařízení), která je kompatibilní. Toto zařízení musí obsahovat také XML soubor, který je psán podle GenICam formátu.
- Standard Features Naming Convention (SFNC) – Standardizuje, jak se mají jednotlivé funkce jmenovat (přibližně 220 běžných funkcí). Tato součást je velice důležitá pro případy, kdy jsou funkce programově volány z aplikace.
- GenTL – Definiuje rozhraní transportní vrstvy, které je používáno na komunikačních kartách od různých výrobců.
- CLProtocol – Jedná se o protokol, který umožňuje přistupovat pomocí GenApi ke kamerám používajícím pro přenos dat Camera Link.

1.5.1 Gigabitový Ethernet

Základní informace:

- Propustnost: 120 MB/s
- Délka kabeláže: až 100 m
- Standard: Gige Vision

Tento typ komunikačního rozhraní je v současné době nejrozšířenější ze všech. Je to především díky tomu, že každá síťová karta v počítači je vybavena Ethernetovým konektorem a ke komunikaci je možné využít standardní síťovou infrastrukturu (routery, switchy). Zároveň lze kameru snadno ovládat pomocí vzdáleného připojení přes VPN nebo Wi-Fi. Další výhodou je snadné použití více kamer současně. V takové situaci je ale nutné dát pozor na to, aby součet jejich datových toků nepřekročil celkovou kapacitu sítě. Pokud by tento problém měl nastat, je v parametrech kamery pole „*Packet Size*“, které je třeba změnit (snížit jeho hodnotu). Parametr *Packet Size* ovlivňuje velikost jednotlivých segmentů dat, které kamera posílá. Pokud je hodnota příliš velká, kamera není schopna poslat všechna data (respektive síťová karta je není schopná přijmout), což se projeví černými pruhy v obraze nebo celkovou nedostupností obrazových dat.

Pro komunikaci s kamerami pomocí gigabitového ethernetu byl vyvinut protokol Gige Vision. Díky němu je komunikace rychlejší a spolehlivější, než s klasickým protokolem TCP používaným pro datovou komunikaci v ethernetu [30]. Na jeho vývoji se podílely firmy, které vyvinuly i standard GenICam. Standard Gige Vision používá API definované standardem GenICam a díky tomu lze používat kamery, hardware a software od různých výrobců současně. Standard Gige Vision se také skládá ze 4 elementů [29][31]:

- Device discovery – Definuje sekvenci událostí (inicializační komunikaci mezi kamerou a PC), díky kterým je kameře (obecně zařízení kompatibilní s tímto standardem) přidělena IP adresa.
- Gige Vision control protocol (GVCP) – Definuje kanály pro přenos obrazu a jak ovládat a konfigurovat kameru.
- Gige Vision stream protocol (GVSP) – Definuje mechanismy pro posílání obrazových a jiných dat.
- Extensible mark-up language (XML) description file – Představuje seznam všech vlastností a funkcí, které kamera může poskytnout. Jeho struktura musí přesně dodržovat GenICam standard.

Při plánování nasazení gigabitových kamer v systému strojového vidění je však třeba vzít v úvahu několik faktorů. Již zmíněné omezení datového toku kamery při použití několika kamer současně a také to, že komunikace zatěžuje procesor počítače více, než ostatní rozhraní. Typicky je to 3 - 8%, pokud je použit ovladač výrobce. Zátěž CPU lze snížit použitím síťové karty se specifickým čipsetem Intel PRO 1000, který většinu komunikace zpracovává již na kartě [30].

1.5.2 USB 3.0

Základní informace:

- Rychlost: 350 MB/s
- Délka kabeláže: až 5 m
- Standard: USB3 Vision

Komunikační rozhraní USB 3.0 bylo vyvinuto v roce 2008. V oblasti strojového vidění se však začalo hojně používat až v roce 2013, kdy největší výrobci digitálních kamer začali toto rozhraní integrovat do svých výrobků (viz obrázek 1.30). To bylo umožněno vyvinutím standardu USB3 Vision. USB 3.0 těží z velmi snadného připojení (Plug & Play) a vysoké propustnosti. Ve srovnání s USB 2.0 je správa komunikace USB 3.0 v mnohém vylepšena. Nabízí vyšší spolehlivost přenosu dat a mnohem nižší zátěž CPU počítače [32]. Další velkou výhodou je napájení. Digitální kamery jsou napájeny přímo z USB 3.0 portu počítače a není proto nutné použít další kabeláž. Mezi nevýhody naopak patří délka kabeláže. Ta je omezena na 5 metrů při použití pasivních kabelů. Obtížnější je také připojit více kamer s rozhraním USB 3.0 k jednomu zařízení. Kamery s rozhraním USB 3.0 často nahrazují starší typy kamer s komunikačním rozhraním USB 2.0 a FireWire [32].



Obrázek 1.28: Ukázka rozhraní USB 3.0 na kameře Basler spolu s kabelem [32][33]

Stejně jako u gigabitového ethernetu, byl i pro USB 3.0 vyvinut standard USB3 Vision, aby bylo možné kamery spolehlivě použít v systémech strojového vidění jako real-time zařízení. Kompatibilita USB3 Vision a GenICam umožňuje vzájemné připojení systémů a kamer různých výrobců bez nutnosti změny ovladačů [32]. Tento standard definuje, jak formátovat a přenášet obrazová data skrz USB sběrnici. Konceptně je velmi podobný Gige Vision. Obsahuje [34]:

- Device Identification and Control – Definuje mechanismus (posloupnost událostí), kterým je kamera identifikována a ovládána.
- USB3 Vision Streaming Protocol (UVSP) – Tento protokol standardizuje, jak mají být data uspořádána a přenesena do počítače.
- Extensible mark-up language (XML) description file – Představuje seznam všech vlastností a funkcí, které kamera může poskytnout. Jeho struktura musí přesně dodržovat GenICam standard.

1.5.3 FireWire (IEEE1394)

Základní informace:

- Rychlost: 32 MB/s (IEEE1394a), 64 MB/s (IEEE1394b)
- Délka kabeláže: až 4,5 m
- Standard: DCAM

Komunikační rozhraní FireWire bylo po mnoho let velmi úspěšným a široce rozšířeným rozhraním pro digitální kamery. Pro strojové vidění sice neexistuje univerzální standard, ale i přesto jsou tyto kamery podporovány v mnoha aplikacích zpracování obrazu. Mezi výhody patří především možnost napájet kameru přímo z FireWire rozhraní a velmi nízká zátěž CPU. Mezi nevýhody patří naopak krátká kabeláž a především malá propustnost. Počet nasazení těchto kamer v dnešní době rychle klesá a kamery jsou nejčastěji nahrazovány modely s USB 3.0 výstupem.

Kamery s FireWire rozhraním používají standard DCAM. Tento standard definuje, jak posílat nekomprimovaný obraz do počítače. Zároveň popisuje, jak konfigurovat jednotlivé parametry kamery, a sjednocuje názvosloví těchto parametrů [35].

1.5.4 Camera Link

Základní informace:

- 255 MB/s (Base, připojení jedním kabelem)
- 510 MB/s (Medium, připojení dvěma kabely)
- 850 MB/s (Full, připojení dvěma kabely)
- Délka kabeláže: až 10 m
- Standard: Camera Link

Camera Link je velice robustní komunikační rozhraní a využívá se především v aplikacích, ve kterých je nutné pracovat s velkým objemem dat a s extrémně nízkou latencí. Jedná se o vysokorychlostní snímání nebo o aplikaci s řádkovou kamerou. Mezi výhody patří vysoká propustnost dat, možnost napájet kameru přímo z rozhraní Camera Link a hlavně nejnížší latence ze všech rozhraní používaných ve strojovém vidění. Pro použití tohoto rozhraní je ale potřeba mít v počítači nainstalovanou komunikační kartu pro sběr obrazových dat, tzv. frame grabber. Ten často bývá vyroben někým jiným než samotná kamera. Kamera se ovládá funkcemi od výrobce kamery, ale obraz se zpracovává funkcemi od výrobce karty. Pro zjednodušení této relativně složité komunikace byl vyvinut Camera Link standard. Stejně jako u předchozích standardů je jeho úkolem spolehlivě přenést obrazová data do počítače [36].

Díky velké oblíbenosti a spolehlivosti tohoto rozhraní se uvažuje o jeho vylepšení. Jedná se o Camera Link HS (HS je zkratka High Speed) a jeho výhody oproti stávajícímu rozhraní budou takovéto [37]:

- Přenosová rychlost od 300 do 16000 MB/s
- Extrémně vysoká spolehlivost přenosu dat
- Extrémně nízká latence v řádu stovek nanosekund
- Délka kabeláže 15 metrů (pro měděné kabely) a 300 a více metrů při použití optického vlákna
- Připojení více kamer k jednomu frame grabberu
- Možnost rozložení přenosové rychlosti mezi více frame grabberů a více počítačů, které budou paralelně zpracovávat data

1.5.5 CoaXPress

Základní informace:

- Rychlost: 780 MB/s, možnost agregace linek až na 3 125 MB/s
- Délka kabeláže: více než 100 m

CoaXPress se označuje jako rozhraní nové generace. Pro přenos dat se používá obyčejný koaxiální kabel, přes který může být kamera také napájena. Výhodou oproti Camera Linku je mnohem vyšší propustnost a délka kabeláže. CoaXPress také umožňuje dosáhnout velmi nízké latence. Pro připojení k počítači je však nutná speciální komunikační karta. Při použití jednoho kabelu je přenosová rychlost 780 MB/s, při agregaci více linek je možné dosáhnout několikanásobné rychlosti – při využití čtyř koaxiálních kabelů se jedná o 3125 MB/s [29][38].

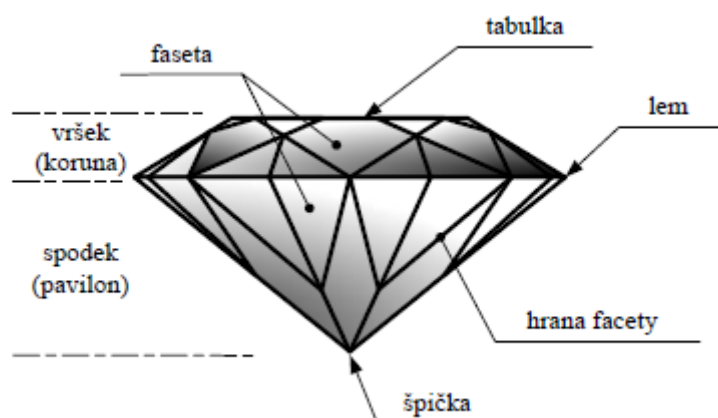
2 Rozbor problematiky inspekce bižuterních kamenů

2.1 Popis částí kamenů

Strojně broušené šperkové a bižuterní kameny (dále též BK) představují geometrické prostorové útvary ohraničené několika vybroušenými plochami, jejichž základní funkcí je především funkce opticko-estetická. Tyto plochy lze zařadit do dvou kategorií:

- opticky funkční
- opticky nefunkční

Opticky funkční plochy se aktivně podílejí na optickém efektu výrobku, kdežto opticky nefunkční se na optickém efektu výrobku významně nepodílejí. Geometricky se dělí na dvě části – vršek a spodek (viz obrázek 2.1). [39]



Obrázek 2.1: Jednotlivé části bižuterního kamene [39]

Vršek je ta část kamene, která je při běžném použití kamenů viditelná. Spodek je část kamene, která naopak při běžném použití BK není vidět. Plochy, které tvoří vršek i spodek se řadí mezi opticky funkční. Tyto dvě geometrické části kamene se stýkají v místě, které se nazývá lem.

Lem je opticky nefunkční plocha, která je kolem největší obvodu kamene. Lem je základním konstrukčním prvkem kamene, který se významně podílí na jeho geometrických rozměrech.

Vršek kamene je tvořen třemi různými útvary. Jedná se o fasety, tabulku a hrany. Faseta je rovinná plocha, která je opticky funkční. Na kameni je jich vždy několik a jejich počet závisí na typu výbrusu kamene. Tabulka je rovněž rovinná opticky funkční plocha, která je však na kamenu jen jedna. Rovina tabulky je rovnoběžná s rovinou lemu. Poslední, ale neméně významnou částí vršku, jsou hrany. Hran je několik typů, ale u BK obecně jsou to úsečky nebo křivky, ve kterých se stýkají facety, tabulka a lem. Rozlišuje se hrana fasety, hrana tabulky a hrana lemu. Hrana fasety je místo styku dvou faset. Hrana tabulky je úsečka, kde se dotýká faseta a tabulka, a hranou lemu se nazývá styk fasety a plochy lemu.

Na spodku kamene jsou rovněž tři útvary. Fasety a hrany jsou stejné, ale místo tabulky je zde špička. Je to bod, ve kterém se sbíhá tři a více faset. Zároveň je funkčním ukončením kamene. [39]

2.2 Vlastnosti bižuterních kamenů a jejich vady

U bižuterních kamenů se rozeznává a hodnotí velké množství vlastností a parametrů. V první řadě se jedná o vlastnosti materiálu, ze kterého je výsledný výrobek zhotoven. Takové vlastnosti ale nejsou předmětem této diplomové práce. Za předpokladu, že byl pro výrobu BK použit materiál splňující všechny požadavky, je nutné provést kontrolu vlastností, které jsou ovlivněny během výroby výrobku a mají proto přímý vliv na jeho užitnou hodnotu. Člení se do následujících skupin:

- opticko-estetické
- geometrické
- odolnost

Pro člověka nejvýznamnější, ale zároveň také nejhůře měřitelné, jsou vlastnosti opticko-estetické. Jsou to takové vlastnosti, které při pozorování světla vycházejícího z výrobku vyvolávají v pozorovateli příznivý estetický vjem. Již z této definice je nanejvýš jasné, že posuzování těchto vlastností bude dosti subjektivní a obtížně parametrizovatelné.

Mezi tyto vlastnosti patří především brilance, oheň a jiskra. Brilance je schopnost kamene změnit směr dopadajícího světla tak, aby to u pozorovatele vyvolalo maximální estetický dojem. Pojem maximální estetický dojem je zavádějící a nelze určit, o jakou hodnotu se jedná. Je však opakovaně odzkoušeno, že při předložení několika vzorků kamenů ukáže 90% lidí jeden konkrétní s tím, že se jim nejvíce líbí. Oheň se posuzuje u bezbarvých nebo jen slabě zabarvených kamenů. Jedná se o schopnost kamene rozkládat bílé světlo na jeho spektrální složky, a to tak, že v žádoucím směru pozorování je dosaženo maximální intenzity a čistoty jednotlivých složek [39]. Vlastnost nazvaná jiskra představuje schopnost kamene měnit intenzitu vystupujícího světla a barevných efektů při drobné změně směru pozorování. Jiskra vyvolává dojem měňavého třpytu kamene.

Úkolem, který mi byl zadán a o kterém tato diplomová práce pojednává, však není posuzovat opticko-estetické vlastnosti a jejich nedostatky, nýbrž vlastnosti mechanické a geometrické. Ty se samozřejmě také podílejí na celkovém estetickém vjemu, ale jsou daleko lépe měřitelné. S tím souvisí i hodnocení vad, které se ve výrobním procesu vyskytují a které je nutné odhalit a eliminovat.

2.2.1 Popis jednotlivých vad a jejich kontroly

Současná inspekce hotových výrobků kontroluje veškeré aspekty a vady, které se u bižuterních kamenů posuzují. Množství odlišně definovaných vad, které se v průběhu výroby mohou objevit a musí se proto kontrolovat, je relativně veliké množství. Pro různé typy vad se využívá různá kontrola.

Prvním typem kontroly je „*Hodnocení pomocí reflexní koule*“. Jedná se o nepřímou kontrolu, protože se fyzicky nekontroluje samotný kámen, ale vystupující světlo. Princip spočívá v tom, že paprsek bílého nebo monochromatického světla je přiveden kolmo na tabulku kamene. Uvnitř kamene proběhne lom a odraz světla na jeho jednotlivých částech a dojde k rozložení světla do množství paprsků, které poté vystoupí z kamene ven. Tyto vystupující paprsky jsou promítnuty na matnici ve tvaru polokoule. Vzniklý obraz určitým způsobem rozložených světelných skvrn pak velmi dobrým způsobem poskytuje informaci o geometrickém rozložení kamene, makroreliefu facet a správné konstrukci kamene.[40]

Další kontrola probíhá za použití „*Profiloprojektoru*“. Pomocí něj se měří základní geometrické poměry na výrobku. Jedná se rovněž o nepřímou kontrolu. Profiloprojektor je zařízení, které na matnici promítne mnohonásobně zvětšený stín určitým způsobem zorientovaného kamene. Tento stín je pak použit pro běžná měření geometrických vlastností (délky, úhly), které není možné měřit přímo na kamenech vzhledem k jejich malým rozměrům.

Přístrojem, který se také používá k hodnocení kamenů, je „*Dotykový profilometr*“. Je to zařízení pro měření reliéfu facet až do hloubky defektů 0,1 μm . Zařízení funguje následovně. Po povrchu facetu přejíždí diamantový hrot. Při přejetí hrotu přes nerovnost na povrchu dojde k jeho vertikálnímu posunu, který je zaznamenán. Výsledkem je veličina, která představuje drsnost povrchu. Toto měření však není úplně přesné.[40]

Mnohem přesněji se povrch kontroluje pomocí „*Interference světelných vln*“. Tyto vlny jsou v různé fázi kvůli odrazu od odlišně vysokých míst v povrchu kamene. Jedná se o velmi citlivou metodu měření geometrických charakteristik povrchu v řádu nanometrů.

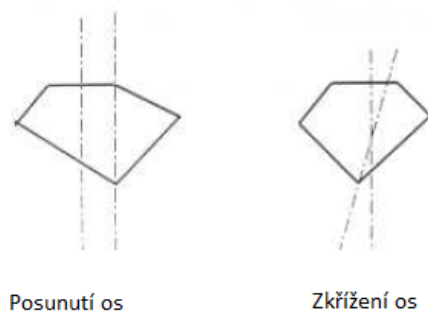
Vzhledem k povaze výrobku je nutné provádět také vizuální inspekci. Prvním typem kontroly je „*Vizuální hodnocení lidským okem*“. Tato kontrola se provádí na výrobcích rozložených na sítech a shodně orientovaných. Často se používá porovnání s referenčním vzorkem. K tomuto posuzování je potřeba zajistit světelný zdroj, který poskytuje světlo, jenž se svou spektrální charakteristikou co nejvíce blíží světlu dennímu, a hlavně proškoleného a zkušeného hodnotitele. Vizuálně se posuzují všechny opticko-estetické vlastnosti a vady, které lze okem rozeznat.

Pro hodnocení určitých vlastností je potřeba kámen zvětšit. „*Vizuální hodnocení lupou*“ se provádí při zvětšení 4x až 20x. Nejčastěji se touto metodou kontroluje povrch výrobku, kvalita výbrusu a vnitřní čistota kamene. Používají se běžné kamenářské lupy, Brinnelova lupa nebo montážní stolní lupy. [40]

Je-li potřeba detailní posouzení přítomnosti různých artefaktů ve výrobcích, používá se „*Vizuální hodnocení mikroskopem*“. Mikroskop má zvětšení 20 – 500x a slouží k rozlišení a identifikaci defektů na povrchu nebo uvnitř výrobku. Mikroskopický obraz může být digitalizován a zpracován počítačem [39]. Právě tato myšlenka dala vzniknout mému úkolu.

Vady, které se kontrolují vizuálně, lze rozdělit do několika skupin. První skupinou jsou **vady geometrické**. Jedná se o vady, kdy je kámen na první pohled nesouměrný. Kamene se pak

nazývají „*Křivé*“ nebo „*Vyosené*“. K těmto vadám dochází, jsou-li osy v kameni vzájemně posunuté nebo zkřížené (viz obrázek 2.2).

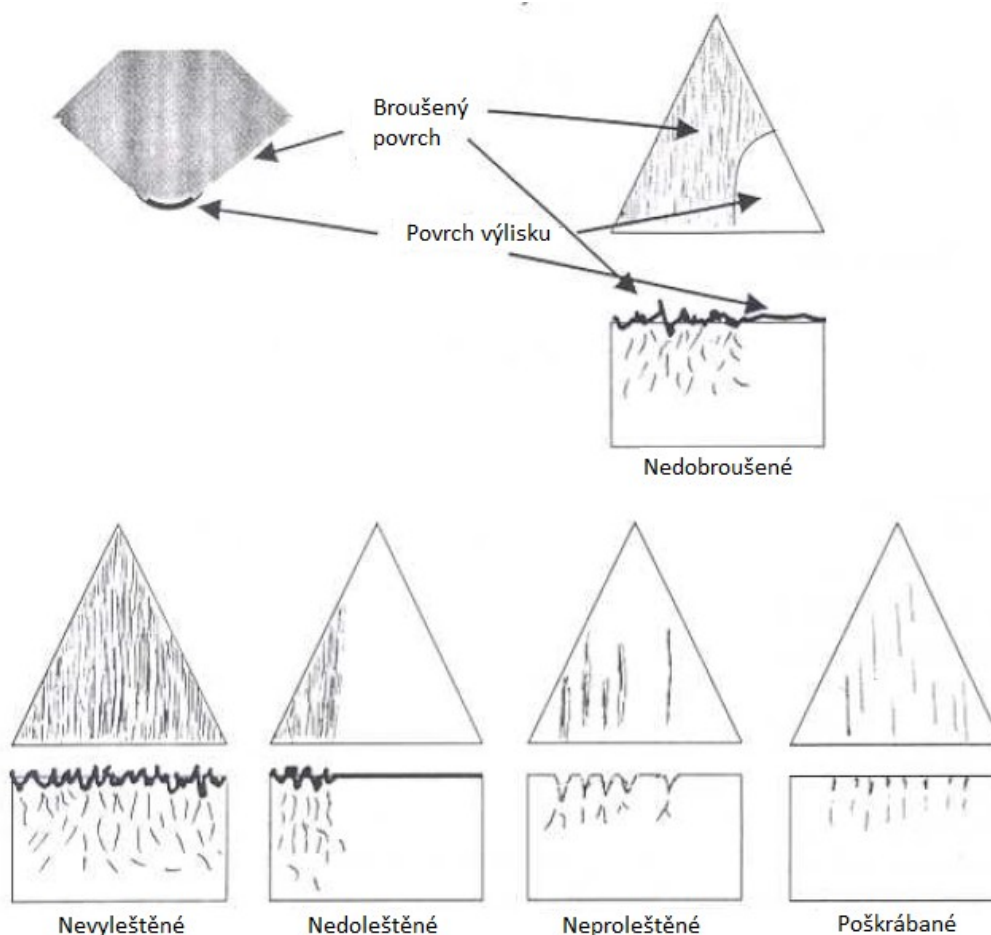


Obrázek 2.2: Vadný profil BK v důsledku špatné vzájemné polohy os [40]

Druhou skupinou jsou **vady mikroreliéfu broušených a leštěných ploch**. Těmito vadami se rozumí defekty na povrchu vyleštěné facety, která by měla být dokonale hladká za ideálních podmínek. Rozměry těchto defektů se pohybují v řádu desetin až desítek mikrometrů. Kvalitativním požadavkem je, aby tyto defekty zaujímal maximálně 0,5% celkové plochy facety. Toto kritérium platí ale pouze v případě, že defekty nejsou koncentrovány na jedno místo. Je-li tomu tak, je kvalitativní požadavek ještě přísnější.

První podkategorií jsou nedobroušené plochy. Jsou to plochy, u kterých část povrchu tvoří povrch původního výlisku, z něhož je budoucí kámen broušen. Jinak řečeno, v daném místě výlisek nepřišel do styku s brusem. Druhou podkategorií jsou plochy nevyleštěné. Nevyleštěné plochy mají celý povrch broušený, to znamená, že daná faceta vůbec nepřišla do styku s leštičkou. Faceta se jeví jako matná. Třetí podskupinu tvoří plochy nedoleštěné. Je to speciální skupina nevyleštěných ploch, kdy do styku s leštičkou nepřišla pouze část plochy. Obvykle se jedná o špičky facet a okolí hran. Čtvrtá podskupina jsou plochy neproleštěné. Neproleštění znamená, že daná plocha byla přeleštěna leštičkou, ale úběr skla byl nedostatečný. Nepodařilo se tak odstranit hlubší brusné rýhy, které vznikají při broušení kamene. Poslední podskupinou jsou poškrábané plochy. Ty vznikají při leštění, kdy se na dobře vyleštěné ploše vytvoří škráby v podobě rýh, které jsou důsledkem smýkání nežádoucí tvrdé nečistoty zvenčí nebo odštěpku broušených kamenů.

Obrázek 2.3 schematicky zobrazuje, jak se výše zmíněné vady jeví při velkém zvětšení pod mikroskopem. Zároveň je u každé vady uveden její charakteristický profil z povrchu do hloubky materiálu.



Obrázek 2.3: Profil vad mikroreliéfu [40]

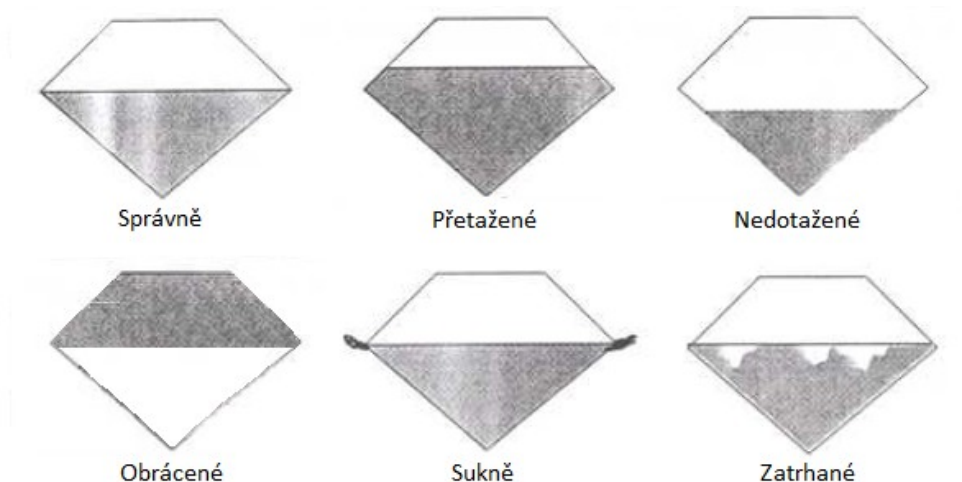
Třetí skupinou vad jsou **vady celistvosti výrobku**. Tyto vady se řadí výhradně mezi mechanické a vznikají nejčastěji při manipulaci s výrobky. Nejedná se pouze o vadu určité plochy, ale kamene jako celku.

První podskupinou jsou kameny rozbité. Za rozbitý se kámen považuje tehdy, je-li rozbit na dvě a více částí nebo je-li v něm zřetelná prasklina, která zasahuje významnou část kamene. Další podkategorií jsou kameny odrcené. Jedná se o oddělení malých kousků materiálu z hran (nejčastěji z lemu). Poslední podskupinou jsou kameny s uraženou špičkou. Na ulomení špičky je výrobek nejnáchylnější v případě, že jeho facety mají dokonalou sbíhavost do špičky.[40]

Poslední skupinou vad jsou **vady simalizační vrstvy**. Simili je tenká kovová vrstva na spodku kamene, která zvyšuje odrazivost světla uvnitř kamene vzhledem k nedostatečnému indexu lomu materiálu. Pokud by tato vrstva nebyla natažená na spodku kamene, světlo by skrz něj prošlo a kámen by nesplňoval požadované opticko-estetické vlastnosti. Kámen se nejdříve opracuje a až poté je na něj tato vrstva natažena. Z toho vyplývá několik možných vad. Jedná se o nedotažené a přetažené simili nebo o tzv. sukně a zatřhané simili (viz obrázek 2.4).

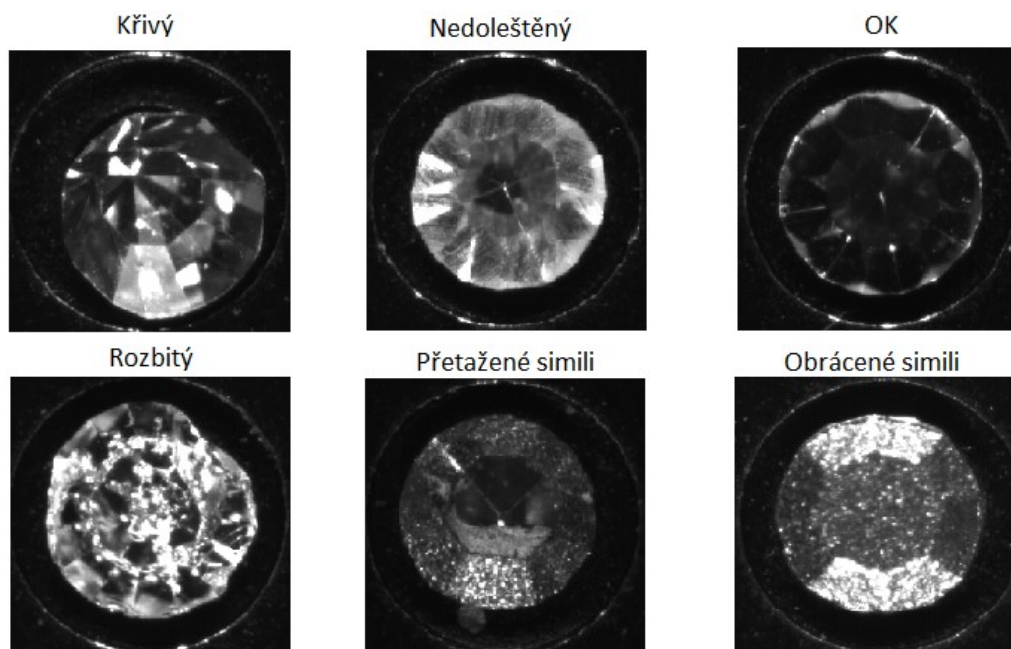
Nedotažené simili znamená, že tato vrstva není natažena od špičky kamene až k jeho lemu. Přetažené simili je pravým opakem. Znamená, že simili je přetaženo i na vršek kamene. Zatrhané simili a sukně vznikají při vylamování z lakové vrstvy. Pokud se při tomto procesu simili nezlomí přesně kolem lemu, ale odtrhne se zčásti i z plotny, ve které je kámen zapaštěn, vzniká sukně. Pokud se stane opak, tzn., že se při vylamování odtrhne i část simulizační vrstvy ze spodku kamene, jedná se o zatrhané simili. [40]

Poslední variantou vady simili, která může nastat, je obrácené simili. Stává se to tehdy, je-li kámen zapaštěn do plotny obráceně, tedy svým vrškem.



Obrázek 2.4: Možné vady simulizační vrstvy [40]

Jak vypadají vybrané vady reálně po nasnímání kamerou, ukazuje obrázek 2.5.



Obrázek 2.5: Jednotlivé kameny nasnímané řádkovou kamerou

3 Návrh a implementace algoritmu pro vyhodnocení dat z kamerového měření do PC-based řešení

Obraz, který nám kamera poskytne, je nutné nakonec zpracovat v určitém softwaru, který obsahuje nástroje a funkce pro práci s obrazem. Na výsledné snímky je nutné aplikovat řadu algoritmů, které pomůžou získat požadované informace o kontrolovaných výrobcích [4]. Zároveň toto prostředí často slouží k ovládání a nastavování samotné optické soustavy, především parametrů kamery. Pro mou diplomovou práci je tímto softwarem nástroj LabVIEW od firmy National Instruments.

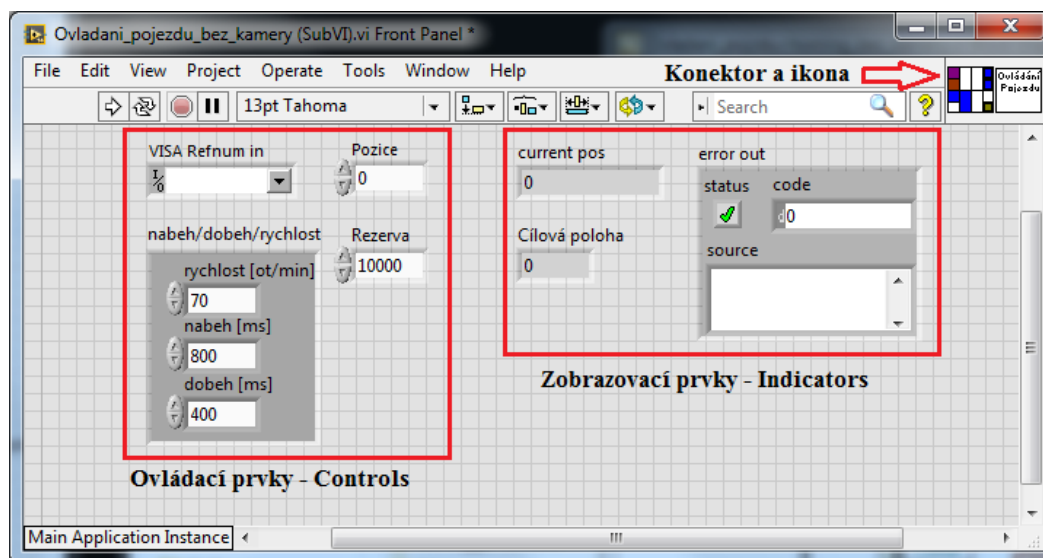
3.1 Vývojové prostředí LabVIEW

LabVIEW (zkratka z Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench) je vývojové prostředí, které obsahuje mnoho knihoven s širokou škálou funkcí. Slouží pro vytváření aplikací zaměřených do oblasti měření a inspekce a umožňuje obsloužit všechny součásti tohoto procesu (sběr dat, jejich analýzu a prezentace výsledků). Data je možné získávat mnoha způsoby, protože LabVIEW podporuje sběr dat přes rozhraní RS232 a GPIB, dále pomocí zásuvných karet a ze systémů na bázi PXI sběrnice [41].

Jednotlivé knihovny a jejich funkce jsou s každou další verzí programu aktualizovány a vylepšovány a díky široké komunitě, která toto vývojové prostředí využívá, vznikají knihovny a funkce nové.

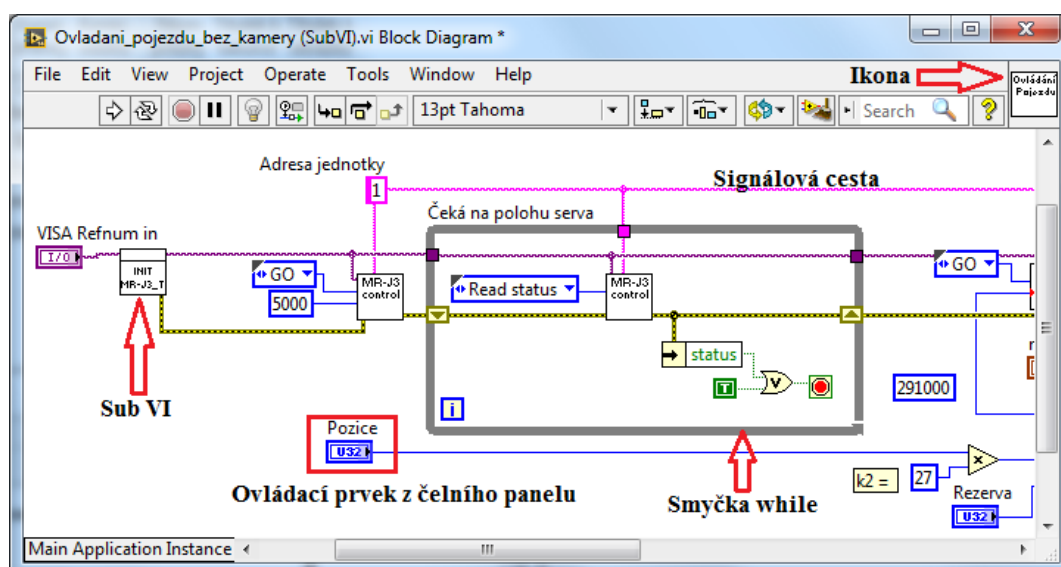
LabVIEW poskytuje vývojáři plnohodnotný programovací jazyk se všemi běžně využívanými datovými a programovými strukturami v grafické podobě. Jedná se o programovací jazyk G, který je na úrovni například jazyka C, ale na rozdíl od něj není orientován textově, ale graficky. Výsledkem tak není psaní textového kódu jednotlivých funkcí, ale skládání a spojování grafických bloků, které tyto funkce představují [41][42].

Výsledná aplikace tohoto prostředí se skládá ze dvou částí. První částí je Čelní Panel (Front Panel), který slouží jako grafické uživatelské rozhraní (viz obrázek 3.1). Funkce čelního panelu představují veškeré prvky pro ovládání celé aplikace a pro zobrazování získaných dat. Těmito prvky mohou být tlačítka, LED indikátory, obraz z kamery, grafy, textová pole a další. Ovládací prvky se nazývají Controls a aplikace reaguje na jakoukoliv změnu, kterou uživatel vykoná. Zobrazovací prvky se nazývají Indicators a jejich úkolem je informovat uživatele o údajích vystupujících z aplikace.



Obrázek 3.1: Čelní panel aplikace s jednotlivými prvky

Druhou částí je Blokový Diagram (Block Diagram), který obsahuje zdrojový kód programu (viz obrázek 3.2). Všechny prvky čelního panelu jsou zobrazeny i zde, ale pouze jako koncové bloky, nikoliv jako tlačítka apod. Blokový diagram navíc obsahuje tzv. uzlové bloky, které na čelním panelu nejsou k dispozici. Tyto bloky jsou ekvivalentní příkazům, operátorům, funkcím a podprogramům klasických programovacích jazyků [41]. Propojují se signálovými cestami (Wires). Dále jsou v blokovém diagramu k dispozici programové struktury (Structures), které odpovídají standardním konstrukcím užívaných v programovacích jazycích (cyklus While, For, Case struktura, přepínač apod.). Signálovým cestám jsou přiřazeny barvy podle toho, jaký typ proměnné prochází daným místem. Tyto barvy odpovídají zažitému barevnému rozlišení z textových programovacích jazyků (textový řetězec – růžová, integer – modrá apod.) [42].

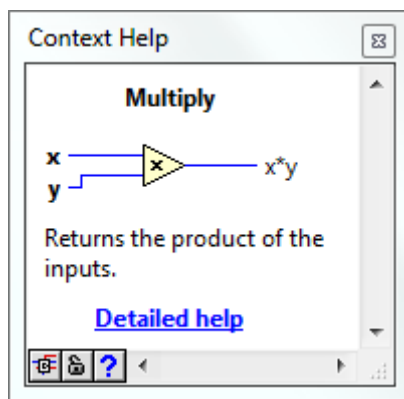


Obrázek 3.2: Blokový diagram s jednotlivými prvky, které tvoří zdrojový kód aplikace

Součástí čelního panelu je také ikona a konektor (viz obrázek 3.1). Jsou umístěny v pravém horním rohu a lze mezi nimi přepínat. Konektor představuje seznam potřebných vstupních parametrů a výstupních parametrů, které jsou k dispozici. Ikona slouží pro zpřehlednění kódu a bude zobrazena v blokovém diagramu, pokud se daná aplikace použije v rámci jiného programu (viz obrázek 3.2). Aplikace se tak stane tzv. Sub-VI, tedy podprogramem. Je to velmi výhodné v tom, že rozsáhlou část kódu můžeme nahradit malou ikonou, která bude mít pouze pár přípojných bodů pro vstupní a výstupní parametry. Zároveň se tato funkce hojně využívá v případě, potřebujeme-li určitou část kódu několikrát v průběhu programu zopakovat.

Průběh aplikace naprogramované v LabVIEW je řízen tokem dat (Data Flow). Jeho jediný, ale zásadní pravidlo je, že uzlový blok může zahájit zpracování dat pouze tehdy, má-li na všech svých vstupech potřebná data. Po vykonání své funkce pak nová data posílá na všechny své výstupy. Výhodou Data Flow je hlavně to, že jednotlivé uzlové bloky mohou pracovat zároveň, pokud splňují výše zmíněné pravidlo. Je možné tedy v programu realizovat paralelismus, což se velmi liší od textově orientovaných jazyků, kde se zdrojový kód vykonává sekvenčně řádek po řádku [41][42].

Další velkou předností vývojového prostředí LabVIEW je dokumentace funkcí a nápověda. Kromě standardní nápovědy, která je velice obsáhlá a zahrnuje všechny funkce použitelné v LabVIEW spolu s příklady použití, je také možné využít tzv. kontextovou nápovědu (Context Help). Jedná se o malé okénko (viz obrázek 3.3), které mění svůj obsah a velikost podle toho, nad jakou funkcí je umístěn kurzor myši. K dané funkci poskytuje seznam vstupních a výstupních parametrů. Vstupy, které je nezbytně nutné připojit nebo definovat (required inputs nebo recommended inputs), jsou zvýrazněny tučně. Ostatní vstupy, které lze sice také připojit, ale nejsou nutné pro vykonání funkce (respektive funkce použije defaultní hodnoty), nejsou nijak zvýrazněny [42]. Ke každému vstupu a výstupu je navíc informace, která popisuje, jaký typ proměnné je očekáván na vstupu.



Obrázek 3.3: Okno s kontextovou nápovědou s dvěma povinnými vstupy (required inputs)

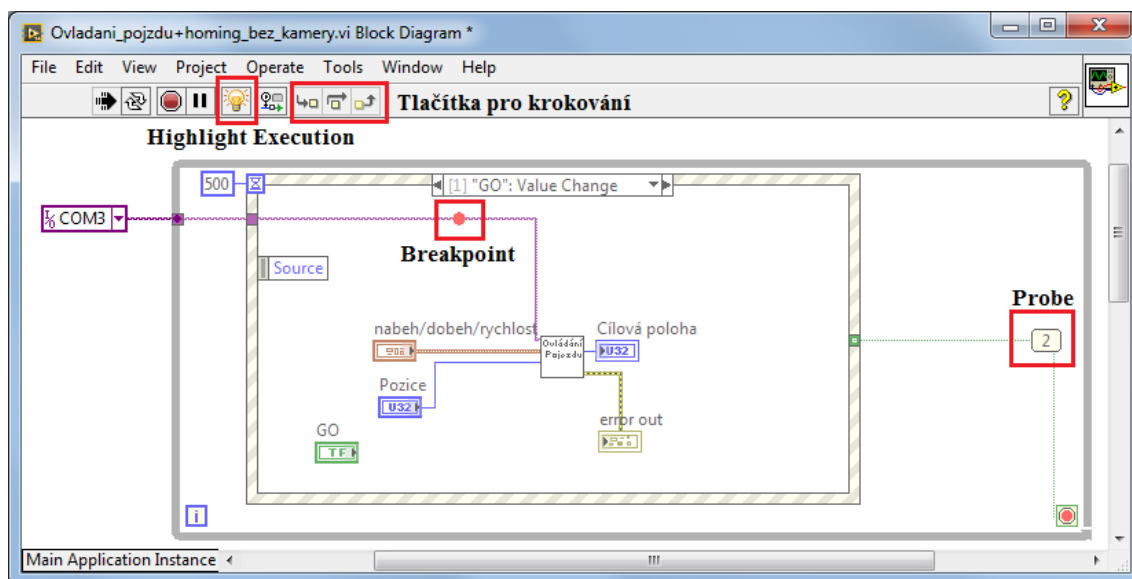
Jako každé vývojové prostředí má i LabVIEW nástroje pro ladění kódu (viz obrázek 3.4). Patří mezi ně Krokování běhu aplikace, Vizualizace toku dat (Highlight Execution), Sondy (Probes) a Body přerušení (Breakpoints).

Krokování běhu aplikace slouží především pro ověření pořadí provádění jednotlivých bloků v duchu pravidla Data Flow, jelikož umožňuje vykonávat zdrojový kód krok po kroku.

Highlight Execution umožňuje vidět za běhu aplikace tok dat se všemi mezivýsledky, které se zobrazí na všech výstupech všech bloků.

Probe je nástroj, který se umísťuje na signální cestu a jeho výstupem je aktuální hodnota dané trasy. Hodnota je však zobrazena až tehdy, když zvoleným místem projdou data.

Breakpoint slouží k pozastavení aplikace v určeném místě, odkud poté můžeme například krokovat.



Obrázek 3.4: Nástroje pro ladění kódu v blokovém diagramu

3.1.1 IMAQ Vision

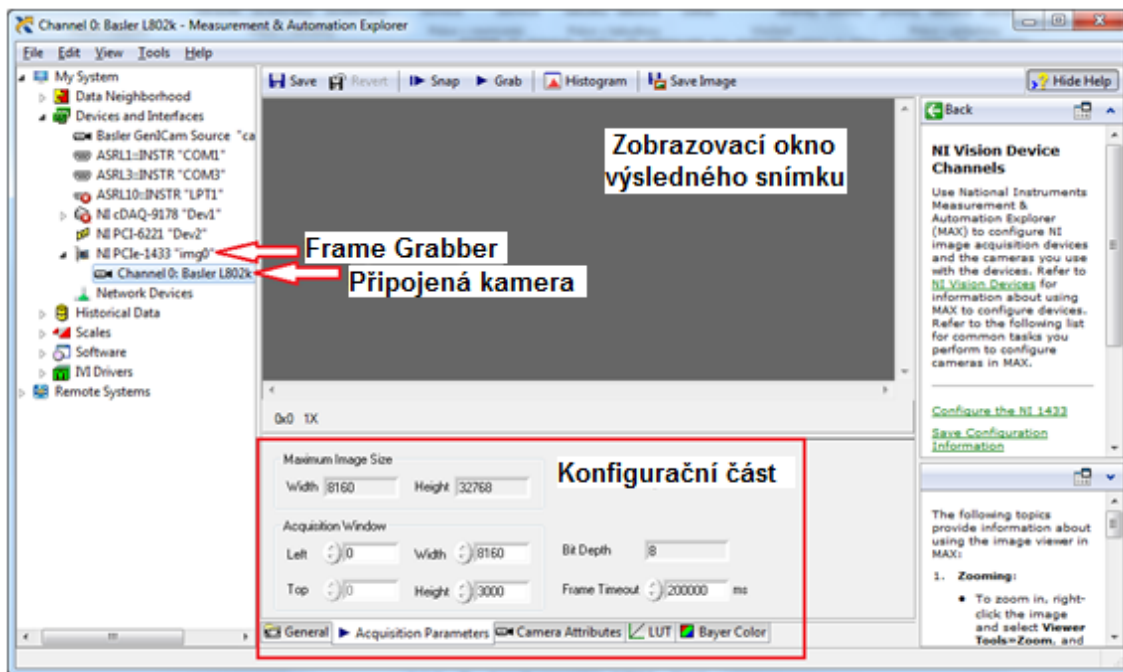
LabVIEW má opravdu mnoho knihoven, pro mne je však nejvíce stěžejní ta, která pracuje s obrazem. Proto, aby bylo možné získat a zpracovat obrazová data, je potřeba mít v LabVIEW nainstalovány součásti, kterými jsou Vision Development module a Vision Acquisition Software. Spolu dohromady tyto dvě knihovny vytváří IMAQ Vision. **Vision Development module** je knihovna, která obsahuje širokou škálu funkcí pro práci s obrazem. Jsou zde uzlové bloky představující funkce od vložení překryvné vrstvy do obrazu, přes jeho prahování až po počítání objektů v obraze.

Vision Acquisition Software slouží především pro komunikaci s kamerami. Umožňuje tyto kamery skrz prostředí LabVIEW nastavovat, triggrovat (spouštět) a získávat z nich data. Firma National Instruments podporuje mnoho výrobců kamer, které se dnes v Machine Vision používají..

Doplňkem prostředí LabVIEW je **Measurement & Automation Explorer** (zkráceně MAX). Tento software se nainstaluje spolu s LabVIEW. Jak jeho název vypovídá, jedná se o prohlížeč, ve kterém je zobrazen veškerý software od firmy National Instrument spolu

Návrh a implementace algoritmu pro vyhodnocení dat z kamerového měření do PC-based řešení

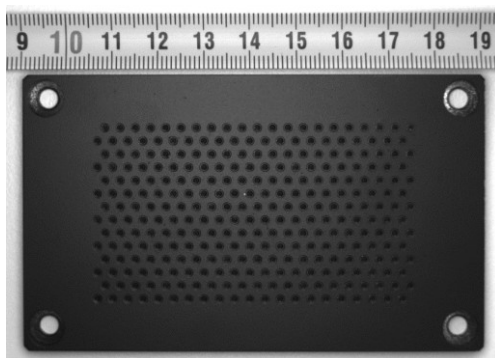
s hardwarem, který je připojen k PC. Pokud tedy připojíme k počítači zásuvnou kartu pro sběr obrazových dat (frame grabber) s kamerou, kameru samotnou nebo jiné zařízení, zobrazí se nám v tomto prohlížeči (viz obrázek 3.5). Zároveň jsme schopni tato zařízení konfigurovat a otestovat jejich funkčnost.



Obrázek 3.5: Prostředí MAXe s připojenou kamerou

3.2 Návrh optické soustavy

Nejdříve bylo nutné seznámit se s vizí firmy Preciosa, a.s., jak by inspekce bižuterních kamenů v ploše měla vypadat. Kameny jsou umístěny v usazovací destičce špičkou dolů (viz obrázek 3.6), a je proto nutné je snímat shora skrz vršek kamene. Poté je nutné dodržet určitý počet kamenů, které mají být nasnímány a následně vyhodnoceny za jednu vteřinu. Dalším požadavkem bylo dostatečné rozlišení kamery.

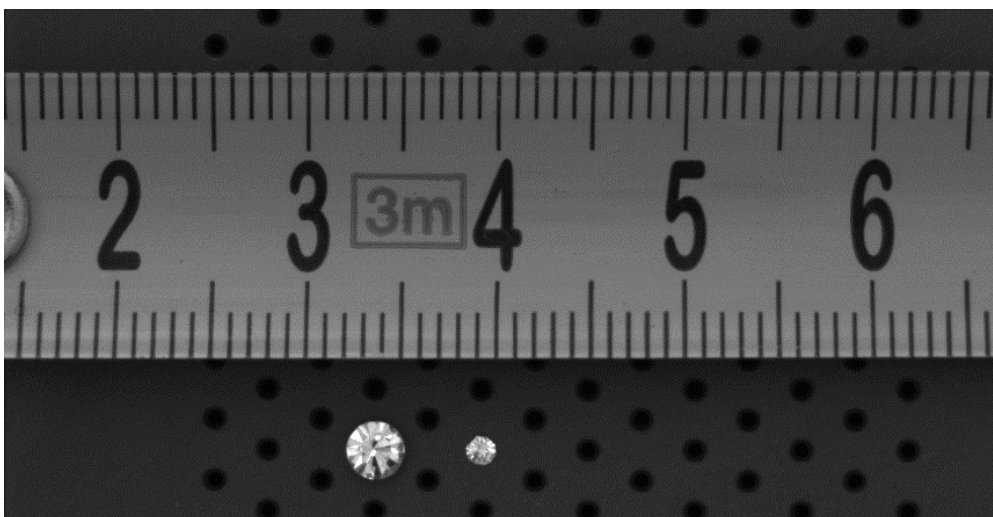


Obrázek 3.6: Obrázek usazovací destičky

Pro splnění tohoto zadání připadají v úvahu dvě varianty. První z nich je snímání plochy plošnou kamerou s dostatečným rozlišením. Myšlenka byla taková, že by kamera spolu s osvětlením byly upevněny na robotickém rameni a jeden snímek by představoval pouze část destičky. Poté by se rameno přesunulo nad další skupinu kamenů atd. Usazovací destička by tak byla statická a po nasnímání celé její plochy by se vyměnila za další s novými kameny.

Druhou variantou je snímání destičky ve smyslu nekonečného pásu. Mechanika by se zcela obrátila. Statická by byla kamera i osvětlení, ale pohybovala by se usazovací destička. Na rozdíl od první varianty by nebyla použita kamera plošná, ale řádková. Rychlost pohybu destičky by tak musela být konstantní. Kamera by nasnímala definovaně dlouhý úsek, odeslala by snímek do počítače a okamžitě by mohla snímat dále. Obě tyto varianty mají své výhody i nevýhody.

Pro testování jsem dostal k dispozici sady kamenů, jenž obsahovaly všechny mechanické a geometrické vady, které je nutno identifikovat, a následně kameny obsahující tyto vady vyřadit. BK se dělí podle velikosti do několika skupin. Pracoval jsem především s kameny s označením SS12 a SS4. Bižuterní kámen SS12 je 3 mm široký a vysoký, BK SS4 je široký a vysoký 1 mm (viz obrázek 3.7).

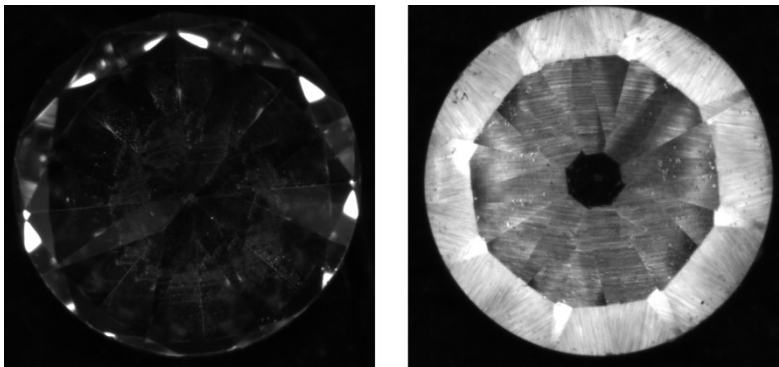


Obrázek 3.7: Ukázka skutečné velikosti bižuterních kamenů (zleva kámen SS12 a kámen SS4)

3.2.1 Varianta s plošnou kamerou

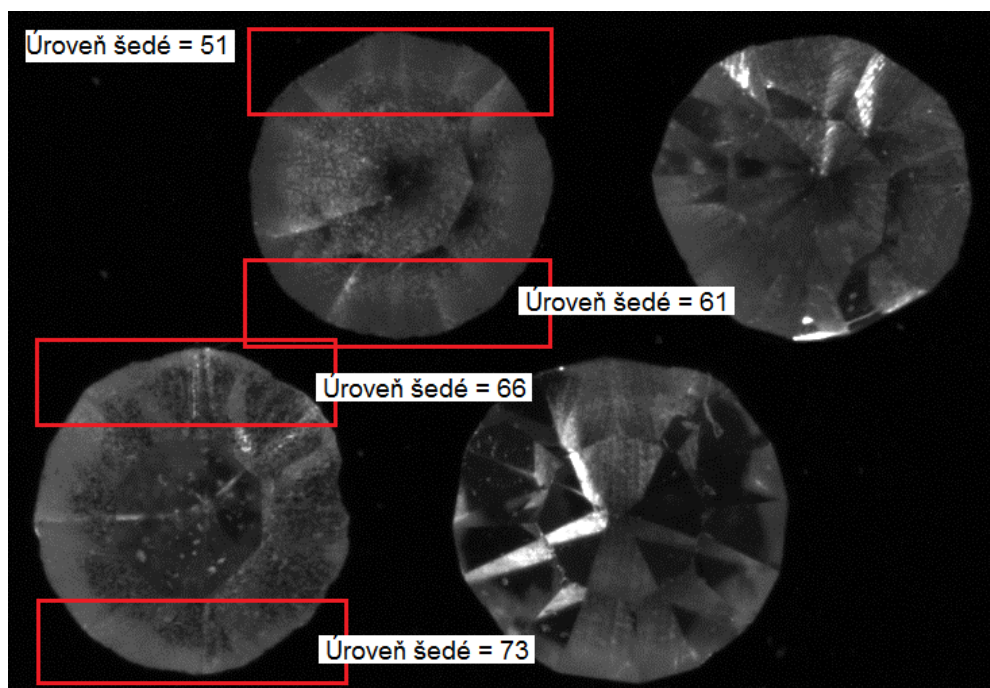
Prvním krokem bylo vybrat vhodnou kameru. Vybral jsem kameru acA2500-14gm od firmy Basler. Jedná se o plošnou kameru s dostatečným rozlišením (2592 x 1944 pixelů) k tomu, aby bylo možné hledat a poté identifikovat vady v jednotlivých BK. Frekvence snímání kamery je nepodstatná, protože jsem snímal statický objekt. Dalším krokem bylo vybrat vhodný objektiv. Vzhledem k tomu, že jsem prvotní testy prováděl pouze na jednom kameni, zvolil jsem makroobjektiv (model MC100X). Velikost BK se pohybuje od 3 mm níže, což je rozměr zorného pole, který je pro makroobjektivy typický. Posledním krokem bylo vybrat osvětlení. Najít vhodné světlo se ale ukázalo jako největší problém. To však není vůbec překvapivé,

vezmu-li v úvahu, že jsem snímal optické (opticko-estetické) prvky. Výsledný obraz byl ovlivňován vzdáleností od vzorku i úhlem, pod kterým bylo světlo vyzařováno. Po otestování několika typů světél (jasné pole, temné pole, světlo s úzkým i širokým úhlem vyzařování atd.) se jako nejlepší pro jeden kámen ukázalo bílé kruhové světlo typu jasné pole od firmy CCS (model LDR2-50SW). Výsledné snímky jsou vyobrazeny na obrázku 3.8.



Obrázek 3.8: BK nasnímané za použití makroobjektivu (vlevo kámen prodejní kvality, vpravo kámen nedoleštěný)

Přešel jsem proto k další fázi, kdy jsem chtěl snímat BK usazené v matici 5x5 kamenů. Poučen z předchozí fáze výzkumu, použil jsem k nasvětlení stejné bílé kruhové světlo. Musel jsem však změnit objektiv. Bylo potřeba použít objektiv, který je schopen pojmout větší zorné pole. Dalším kritériem byla schopnost objektivu zobrazit krajní kameny tak, aby nebyly deformované vlivem zkreslení. Zvolil jsem tedy objektiv telecentrický od firmy OptoEngineering, model TC23036. Dosahoval jsem podobně dobrých výsledků jako v předchozí fázi, ale ukázalo se, že kruhové světlo používané v předchozí části experimentu není úplně ideální. Světlo nedokázalo osvětlit celou plochu rovnoměrně. Kameny umístěné více do středu byly ozářeny dostatečně, ale kameny blíže kraji byly vždy z jedné strany méně ozářeny (viz obrázek 3.9).

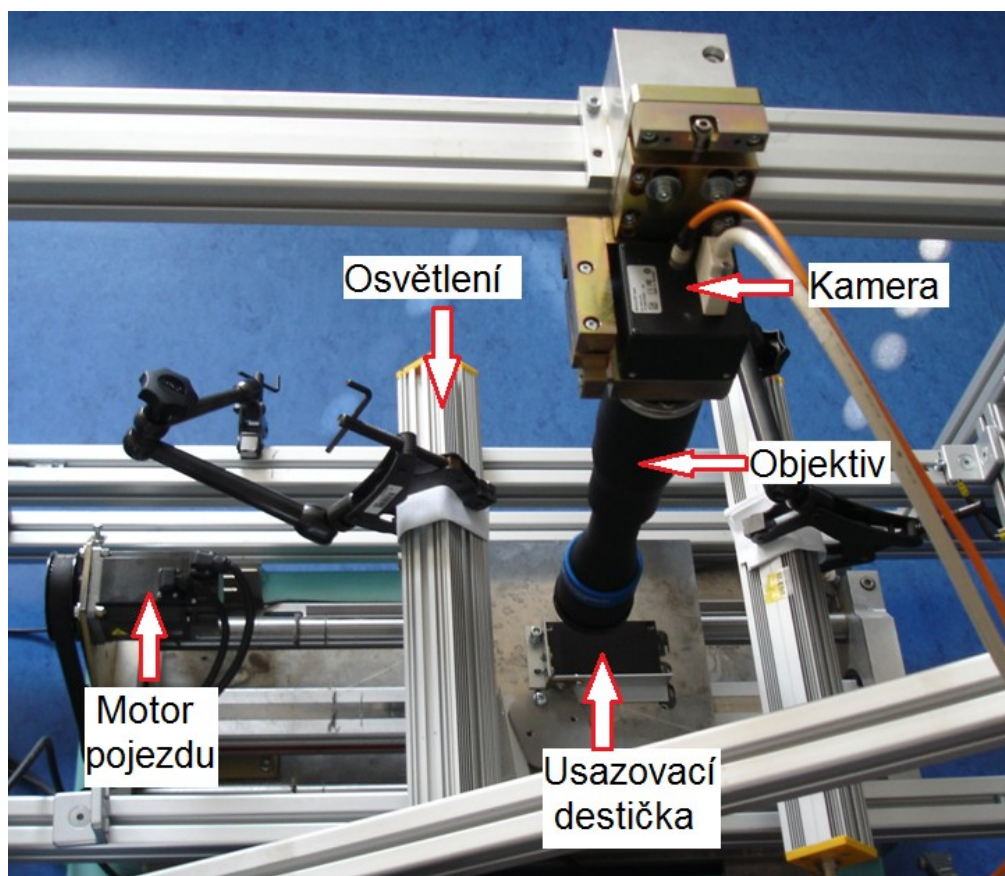


Obrázek 3.9: Ukázka úbytku světla směrem k hornímu okraji obrazu (jedná se pouze o výřez ze skutečného snímku)

Varianta s plošnou kamerou je použitelná, ale pouze v případě, kdy by se kontrolovalo menší množství kamenů. Vzhledem k zadané kadenci a problémech s homogenitou osvětlení jsem přešel k testování použití řádkové kamery.

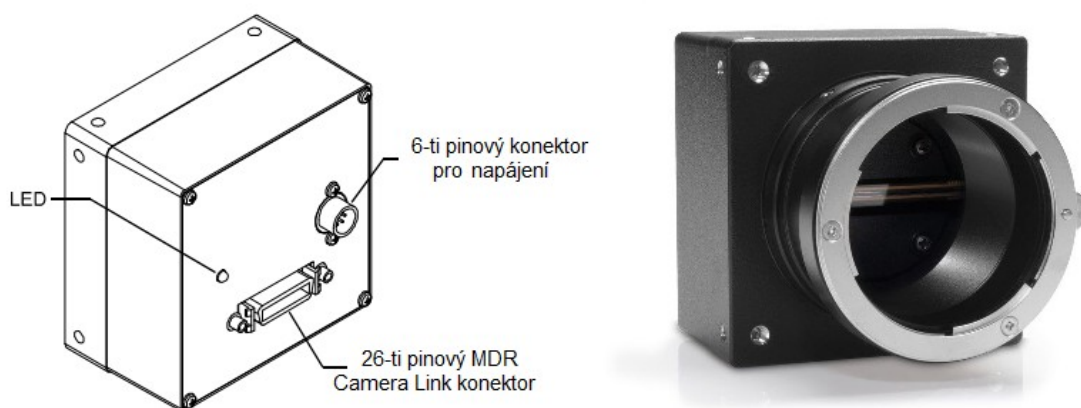
3.2.2 Varianta s řádkovou kamerou

Pro použití řádkové kamery bylo nutné navrhnout zcela novou optickou soustavu. Dále bylo třeba zajistit pojezd s konstantní rychlostí pohybu. Takový pojezd i s ovládacím softwarem jsem dostal k dispozici od firmy Preciosa (viz obrázek 3.10).



Obrázek 3.10: Fotografie modelového zařízení

Zároveň mi byla poskytnuta řádková kamera L802k od firmy Basler. Tato kamera má jeden řádek pixelů o délce 8160 px (pixelů), což je v reálných jednotkách 40,8 mm. Velikost jednoho pixelu je $5 \times 5 \mu\text{m}$. Vzhledem k této délce kamerového čipu bylo nutné použít závit typu F-mount, aby nedošlo k zakrytí okrajů senzoru. Zároveň musí být přeneseno velké množství dat. To je zajištěno pomocí rozhraní Camera Link Base, které má kapacitu až 255 MB/s. Označení Base znamená, že je použit pouze jeden kabel. Kamera je napájena externě z počítače přes 6-ti pinový konektor. (viz obrázek 3.11).



Obrázek 3.11: Kamera Basler L802k [43]

Vzhledem k tomu, že komunikační rozhraní kamery je Camera Link, je nutné použít pro přenos dat do počítače zásuvnou kartu pro sběr obrazových dat se stejným rozhraním. Taková karta se nazývá frame grabber. Ve většině případů je výrobce kamery a komunikační karty jiný. Důsledkem toho je, že při konfiguraci parametrů kamery se používá jiný program, než při nastavení způsobu komunikace na straně karty. Stejně tak mnou používané komponenty jsou od různých výrobců: komunikační karta (model NI-PCIE 1433, viz obrázek 3.12) je od firmy National Instruments a řádková kamera je od firmy Basler. Pro nastavení parametrů kamery se používá program CCT+ (Camera Link Configuration Tool Plus, viz Kapitola 3.2.3), který je volně stažitelný na stránkách firmy Basler, ale pro zobrazení snímků je nutné použít program MAX od firmy National Instruments.



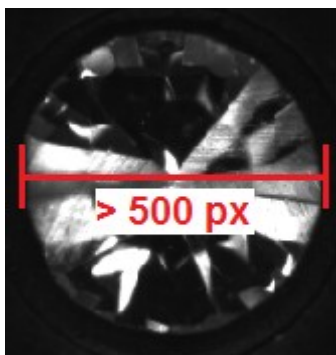
Obrázek 3.12: Frame grabber NI-PCIE 1433 [44]

Další komponentou, kterou bylo třeba zvolit, je nový objektiv. Musel jsem zůstat u telecentrického objektivu, ale potřeboval jsem takový, který pojme dostatečně velké FOV. Vybral jsem objektiv s označením T16M36 od firmy OptoEngineering (obrázek 3.13). Průměr čela objektivu je 61 mm a jeho délka činí 309 mm. S daným senzorem dokáže vykreslit zorné pole o délce 41 mm. Díky této vlastnosti plně vyhovuje požadavku, že na jeden kámen o velikosti SS12 má připadat alespoň 500 pixelů. Znamená to, že 3 mm ve skutečnosti budou

mít v obrazu rozlišení alespoň 500 pixelů (viz obrázek 3.14). Tento požadavek byl stanoven proto, aby vyhodnocovací algoritmy měly k dispozici dostatečné množství obrazových dat. Hloubka ostrosti činí 1 mm.



Obrázek 3.13: Objektiv OptoEngineering TC16M36 [45]



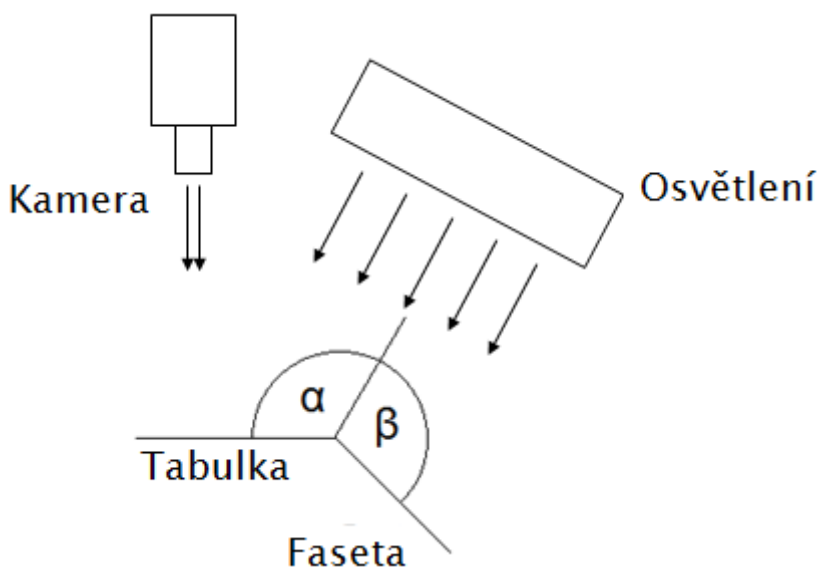
Obrázek 3.14: Snímek kamene o velikosti 3mm, který má rozlišení v obraze více než 500 pixelů

Poslední částí, která se musela změnit, je osvětlení. Musel jsem použít takové světlo, které by celou destičku osvítilo rovnoměrně v délce celého řádku, který kamera snímá. Vybral jsem osvětlení Effi-Flex_20_000 od firmy Effilux (viz obrázek 3.15). Nejedná se o typicky řádkové osvětlení, ale vzhledem ke konstrukci a homogenitě vyzářeného světla jej lze použít v kombinaci s řádkovou kamerou.



Obrázek 3.15: Osvětlení Effi-flex [46]

Vyzařovací úhel tohoto světla je 10° . Abych ozářil celý snímáný řádek rovnoměrně, musel jsem použít alespoň dvě taková světla, každé z jedné strany kamery umístěné rovnoběžně se senzorem. Nyní jsem musel zvolit nejvhodnější úhel, pod kterým budou světla na destičku svítit. Vzhledem k tvaru kamenů je nejlepší variantou svítit na hranu mezi tabulkou a fasetou (viz obrázek 3.16). Pokud by se zmenšoval úhel α , došlo by k přímému odrazu světla do kamery od tabulky. Pokud by se naopak zmenšoval úhel β , světlo by se odráželo do kamery od faset. Tím, že osvětlení míří na hranu kamene, neodráží se od ploch vršku kamene do kamery žádné světlo a kamera je schopna vidět dovnitř kamene.



Obrázek 3.16: Demonstrace úhlu nasvícení vůči kameře a objektu

3.2.3 Konfigurace kamery L802k pomocí programu CCT+

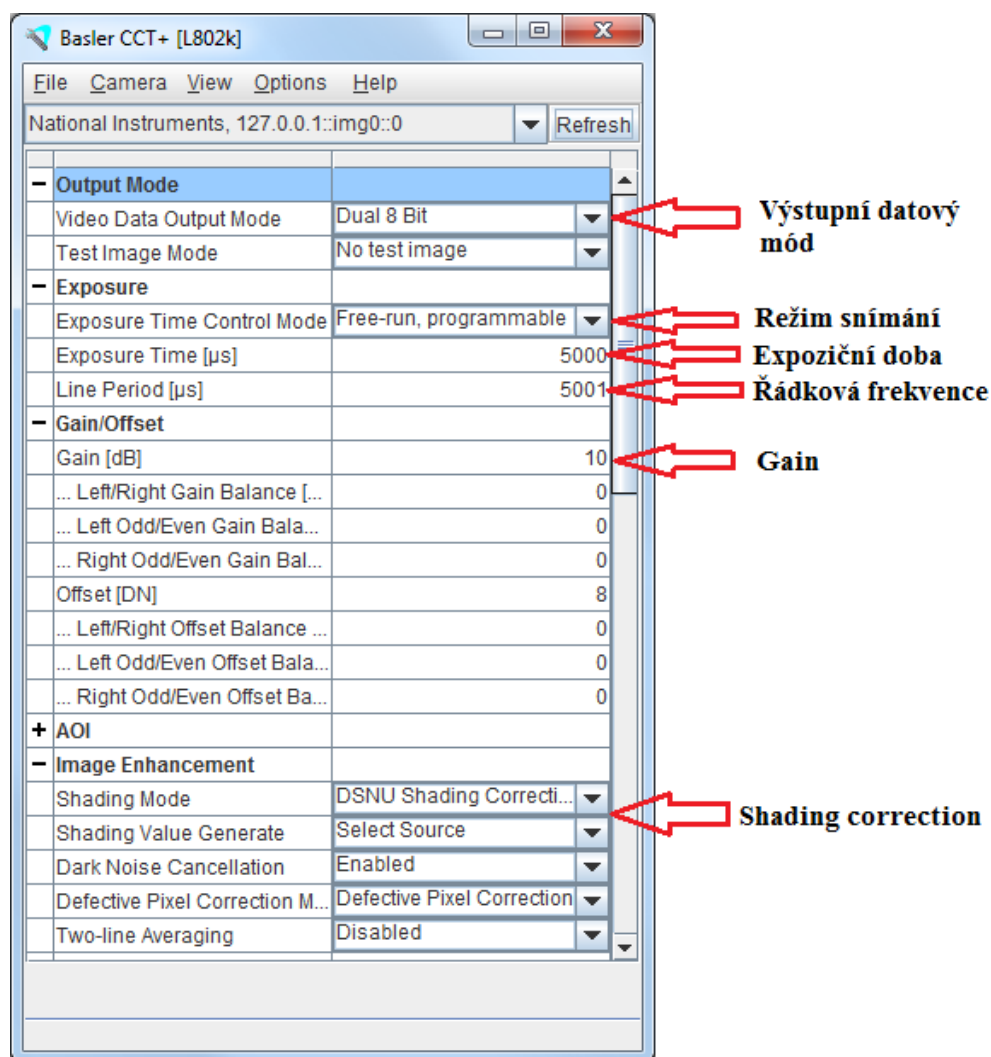
Pro konfiguraci řádkové kamery je nutné použít program CCT+ od firmy Basler. Slouží pro nastavování jednotlivých parametrů kamery, kterých má kamera opravdu hodně. Pro mne jsou nejdůležitější parametry tyto: výstupní datový mód, režim snímání, expoziční doba, řádková frekvence, gain a shading correction (viz obrázek 3.17). Po spuštění program sám vyhledá kamery, které jsou připojeny k počítači.

Nejprve je nutné nastavit výstupní datový režim (parametr „*Video Data Output Mode*“). Jedná se o nastavení způsobu, jakým budou vyčítána obrazová data. Tento typ kamery umožňuje vybrat několik variant (viz obrázek 3.18). Pro mé účely je vhodné použít režim „*Dual 8 bit mode*“, protože vyčítání dat v tomto režimu funguje následovně. V každém cyklu, kdy se vyčítají data z kamery, jsou přeneseny informace o dvou pixelech, jejichž hodnota je zakódována do 8 bitů. V prvním cyklu se vyčte informace o 1. a 2. pixelu, v druhém o 3. a 4. atd. Tento proces proběhne pro celý řádek a končí 4080. cyklem, kdy jsou přenesena data o pixelech 8159 a 8160 (za předpokladu, že využíváme celou délku řádku). Ostatní módy

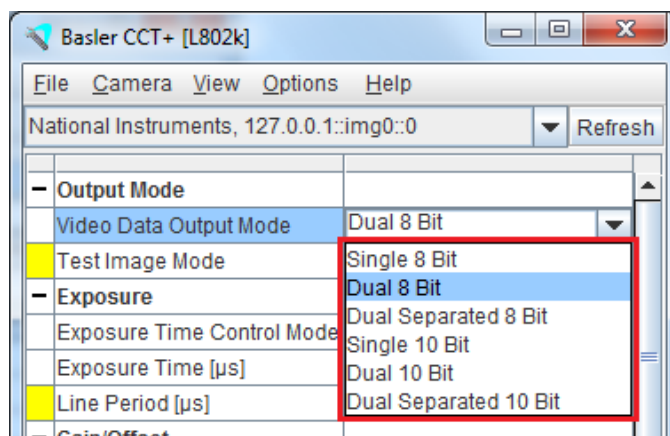
Návrh a implementace algoritmu pro vyhodnocení dat z kamerového měření do PC-based řešení

vyčítání dat se liší v bitové hloubce nebo pořadí a množstvím pixelů, které jsou v jednom cyklu vyčteny. Výhodou tohoto módu je přenos obrazových informací o dvou pixelech v každém cyklu (místo o jednom pixelu), což zajišťuje lepší využití přenosové kapacity a rychlejší přenos dat.

Nejnovější kamery jsou schopny přenést v jednom cyklu informace o 8 pixelech, které mají bitovou hloubku 16 bitů. K frame grabberu musí být však připojeny pomocí dvou kabelů typu Camera link (jedná se o Camera link full konfiguraci).



Obrázek 3.17: Program CCT+ s popsanými parametry



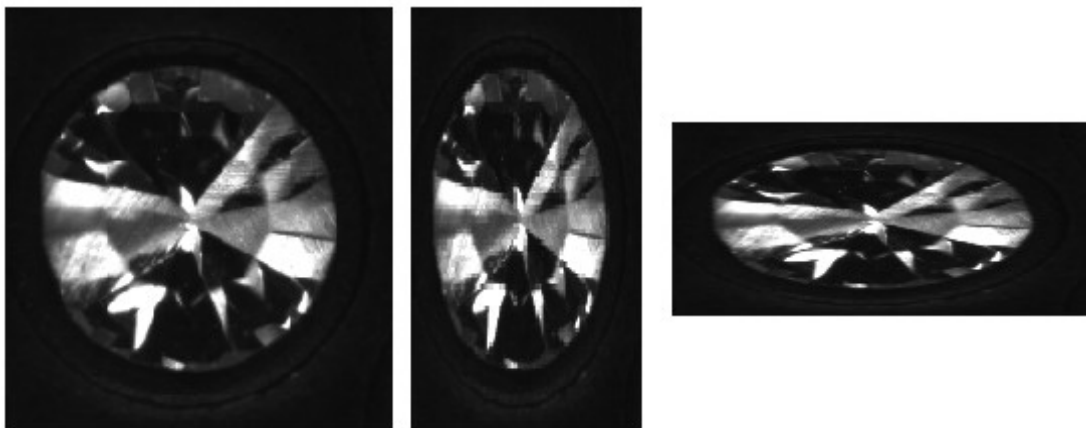
Obrázek 3.18: Jednotlivé varianty parametru Video Data Output Mode

Dalším důležitým parametrem je „*Exposure Time Control Mode*“. Pomocí něj se nastavuje typ řízení expoziční doby, a jak budou triggovány jednotlivé řádky obrazu. Pokud je kamera nastavena v režimu „*Exsync Mode*“, jsou jednotlivé řádky triggovány pomocí externího signálu. Frekvence tohoto signálu je synchronizována s rychlostí, kterou se snímáný objekt pohybuje, a proto není nijak deformovaný. Takový signál může být do kamery přiveden z frame grabberu pomocí kabelu Camera link nebo použitím I/O kabelu, který propojuje kameru a triggovací zařízení. Je-li kamera v režimu „*Freerun*“, nejsou jednotlivé řádky externě triggovány, ale kamera snímá nastavenou řádkovou frekvencí. Tuto frekvenci nastavuje uživatel a kamera potom generuje vlastní vnitřní signál, kterým jsou jednotlivé řádky triggovány. Tento režim má velké úskalí a tím je synchronizace. Existuje totiž velmi úzký vztah mezi řádkovou frekvencí a rychlostí, kterou se zkoumaný objekt pohybuje. Pokud není tento vztah dodržen, jsou výsledné snímky deformované. Objekt se pak jeví jako protažený nebo naopak zkrácený (viz obrázek 3.19).

Synchronizace je vypočtena pomocí vzorce 3.1, kde LpS představuje řádkovou frekvenci (*lines per second*).

$$LpS = \frac{\text{rychlost pohybu objektu}}{\text{velikost pixelu} * \text{zvětšení objektivu}} \quad (3.1)$$

Je-li velikost pixelu například $5\mu m$, zvětšení objektivu 2x a rychlost pohybu objektu 10 mm/s, bude pro zajištění synchronizace nutné nastavit na kameře řádkovou frekvenci 1 kHz. Kamera tak za jednu vteřinu nasnímá 1000 řádků a každý řádek ve skutečnosti zachytí $10\mu m$ pohybujícího se objektu. Je tak možné nasnímat deset milimetrů za jednu vteřinu.



Obrázek 3.19: Ukázka vlivu synchronizace na výsledný obraz (vlevo kámen nasnímaný správně, uprostřed kámen s vysokou řádkovou frekvencí, vpravo kámen s nízkou řádkovou frekvencí)

Expoziční doba je čas, kdy jsou fotocitlivé prvky čipu kamery vystaveny přímé interakci s dopadajícími fotony a tím je v nich kumulován náboj, který je posléze převeden na digitální informaci. Jedná se o parametr, který ovlivňuje jasnost snímku. Platí zde přímá úměrnost – čím delší expoziční doba, tím světlejší snímek. Délka expoziční doby je shora omezena hodnotou parametru „*Line Period*“.

Řádková frekvence udává, kolik řádků kamera bude snímat za jednu vteřinu. Kamera L802k ale tento parametr nemá k dispozici. Místo toho je používán parametr *Line Period*, který udává čas potřebný k nasnímání jednoho řádku. Z této hodnoty se teprve řádková frekvence počítá. Expoziční doba musí být tedy vždy kratší, než hodnota *Line Period*. Výpočet řádkové frekvence je velice jednoduchý. Jedná se o převrácenou hodnotu nastavovaného parametru:

$$LpS = \frac{1}{Line\ Period} \quad (3.2)$$

Gain je parametr, který popisuje citlivost kamery při zachování expoziční doby. Také zde platí přímá úměrnost – čím vyšší gain, tím jasnější snímek. Jedná se o zesílení analogového signálu ještě před jeho převedením na digitální číslo. Společně s užitečným signálem se zesiluje také šum, který je při vysokých hodnotách zesílení zvláště patrný [47]. U mnoho kamer je gain reprezentován číslem v rozmezí 0-1023, které lze následně přepočítat na decibely (dB) pomocí manuálu ke kameře. U kamery L802k se však nastavuje přímo v jednotkách dB.

Shading correction je funkce, která upravuje úroveň šedi. I když je dnes výroba kamerového senzoru velice přesná, ne všechny světlocitlivé buňky se chovají stejně. Pro určitou úroveň šedi musí každá buňka přijmout určité množství světla (počet fotonů), ze kterého vznikne určité množství náboje. Toto množství náboje je pak převedeno na digitální hodnotu v rozmezí 0-255. Není však zaručeno, že všechny buňky vytvoří ze stejného množství fotonů stejně velký náboj. Toto rozdílné chování buněk je upraveno právě pomocí shading correction. Tato funkce zajišťuje, aby uniformní objekt byl nasnímán opravdu uniformně, a musí před aplikováním projít kalibrací. Existují dvě varianty kalibrace. Může se provádět na černém,

nebo bílém objektu. Typ kalibrace se vybírá podle toho, jak vypadá snímáný objekt. Pro tmavý se používá kalibrace s černým objektem apod. Proces kalibrace nastaví, že aktuální hodnoty náboje v jednotlivých buňkách představují černou, respektive bílou. Pokud kalibrace proběhla v pořádku, bude v parametru „*Last Shading Generation Failed*“ hodnota 0. Pokud kamera kalibraci neprovedla korektně nebo došlo k jinému problému, bude v tomto poli hodnota 1.

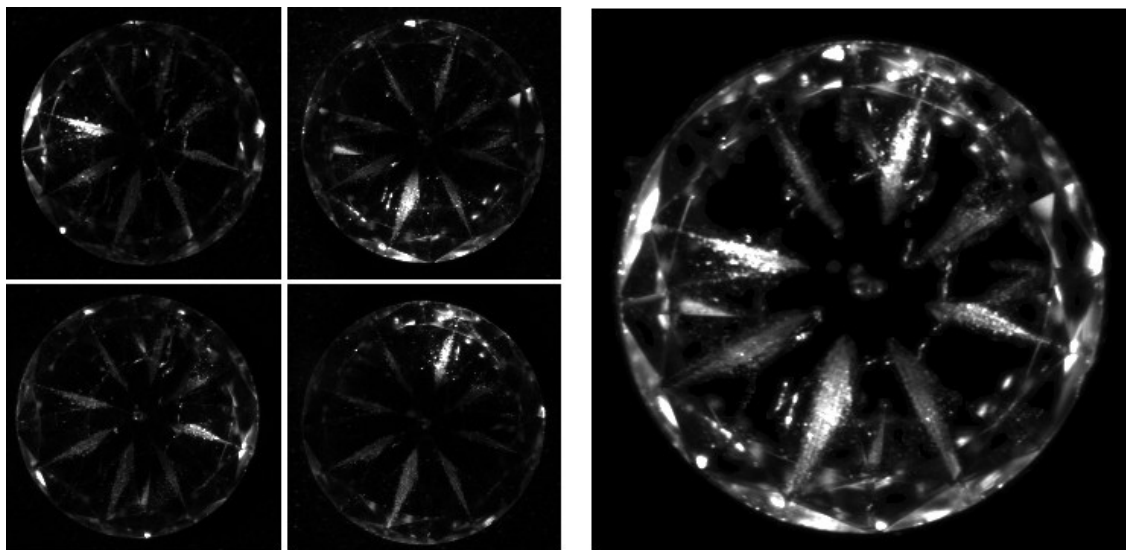
3.3 Popis algoritmů

Získat kvalitní obraz, který bude obsahovat všechny potřebné informace je pouze první část celého procesu strojového vidění. Druhým krokem je zpracování těchto dat. To probíhá pomocí algoritmů, které se aplikují na pořízené snímky. Slovo algoritmus je široký pojem, který obecně znamená postup, jak vyřešit určitý problém nebo provést úkon. V této diplomové práci bude pojmem algoritmus myšlen program (nebo jeho část), který dokáže analyzovat obrazové informace z pořízených snímků nebo s nimi dále pracovat (upravovat je, ořezávat apod.).

3.3.1 Algoritmus pro snímání obrazu

Původní úloha, ze které vzniklo zadání pro mou diplomovou práci, získávala obraz poněkud odlišným způsobem. Princip byl takový, že kámen orientovaný na tabulce byl osvětlen postupně čtyřmi světly, která byla rozestavěna kolem něj. Vznikly tak čtyři snímky jednoho kamene a na každém z nich byl kámen osvětlen jedním světlem pokaždé z jiné strany. Na tyto snímky byl aplikován algoritmus, který provedl jejich fúzi (viz obrázek 3.20). Fúze více obrazů znamená, že se hodnoty jednotlivých pixelů sečtou a následně vydělí počtem obrazů. A to buď lineárně (aritmetický průměr) nebo se použije určitý druh transformace, který je nelineární (fúze založená např. na F-transformaci, Lukaszewiczově algebře [48]). U každého typu fúze však musí být zajištěno, aby se sčítaly souhlasné pixely (pixel o koordinátách například [10,10] musí zachycovat přesně stejný snímáný bod na všech snímcích), jinak by došlo ke zkreslení výpočtu. To se v praxi zajišťuje přesným nastavením kamery i programu nebo vložím kalibrační značky (nejčastěji kříž) do snímku, od které se poté počítají vzdálenosti. Důvodem, proč se fúze dělá, je získat obraz, který v určitém ohledu poskytuje lepší charakteristiku než každý ze samostatných vstupních obrazů [48]. V případě zkoumání bižuterních kamenů tato fúze eliminuje především nežádoucí odlesky kamene, které velice ovlivňují výsledné ohodnocení kamene.

O ohodnocení kamene se stará další algoritmus, který je schopen rozpoznat dobrý kámen od špatného na základě tzv. učící sady. Tento algoritmus byl poskytnut firmou Preciosa a.s. Učící sadu představují kameny, které jsou vybrány a rozděleny podle typu vady do skupin. Pomocí vhodné abstrakce artefaktů v kameni se program naučí rozeznávat tyto vady a poté je schopen již sám třídit kameny s různými vadami. Každému kameni je přiřazena určitá číselná hodnota, která kvantifikuje míru vady v něm. Tato číselná hodnota je porovnávána s hodnotou mezní, kterou nastaví výrobce kamenů a která udává hranici, kdy je kámen ještě prodejný a kdy už ne.



Obrázek 3.20: Čtyři zdrojové obrazy a výsledný fúzovaný obraz

Pro snímání kamenů v ploše jsem sice mohl čerpat ze zkušeností nabytých z úlohy, která je popsána v předchozích dvou odstavcích, ale již od počátku bylo jasné, že podobnost mezi těmito dvěma úkoly je velmi malá. Zde jsou základní rozdíly:

- Primárně se jedná o jiný typ kamene – na spodku je natažena simulizační vrstva a materiál, ze kterého je vyroben, je rovněž jiný. Kámen je nutné snímat skrz tabulku.
- Osvětlení musí vyzařovat homogenní světlo v celém řádku.
- Použití dvou osvětlení rovnoběžných s řádkem.
- Použití dalších dvou osvětlovačů, které budou umístěny z boků a které musí osvětlit stejnou intenzitou kámen první i poslední.
- Mnohem větší počet kamenů, které musí být zkontrolovány za časovou jednotku.
- V tuto chvíli je pořízen pouze 1 zdrojový obraz. Není proto možné aplikovat fúzi a nežádoucí odlesky, nejčastěji na hranách faset, nelze eliminovat. Pro více zdrojových obrazů by se muselo realizovat více identických optických sestav.

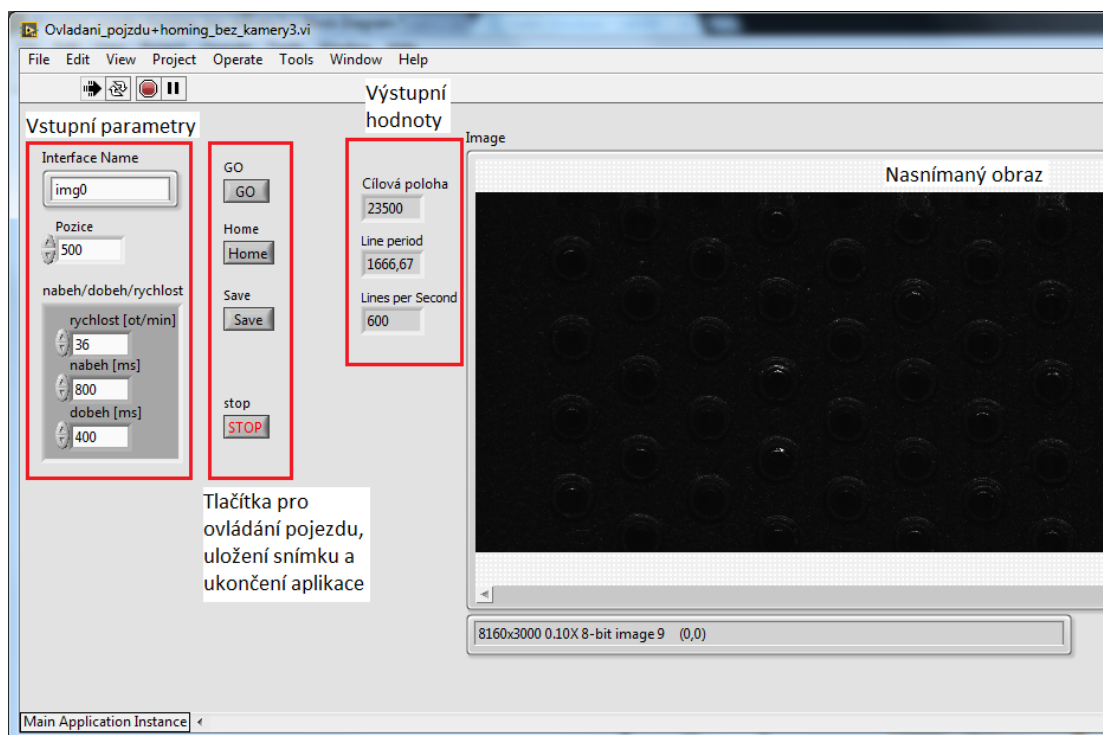
Za nejpodstatnější rozdíly považuji první a poslední, které spolu do značné míry souvisí. Tím, že je nutné kámen snímat skrz tabulku a na spodní straně je simulizační vrstva, světlo nemůže být vyvázáno z kamene jinudy než opět skrz tabulku, popřípadě horní fasety. To znamená, že nežádoucí odlesky budou vždy přítomné a změnou úhlu osvětlovačů nelze jejich vznik eliminovat. Tyto nežádoucí odlesky se vyskytují především na hranách spodních faset. Možným řešením je více zdrojových obrazů a následná fúze.

Algoritmus pro snímání kamenů v ploše, který jsem vytvořil, má za úkol nasnímat obrázek definované délky tak, aby obraz nebyl deformovaný. Toho lze docílit buď pomocí externí synchronizace s použitím kvadrurního enkodéru, který dokáže generovat triggrovací pulzy, nebo při práci s kamerou ve freerun režimu. Já jsem využil freerun režim, a proto bylo nutné použít vzorec pro zajištění synchronizace (viz Kapitola 3.2.3, vzorec 3.1).

Algoritmus lze rozdělen do tří částí:

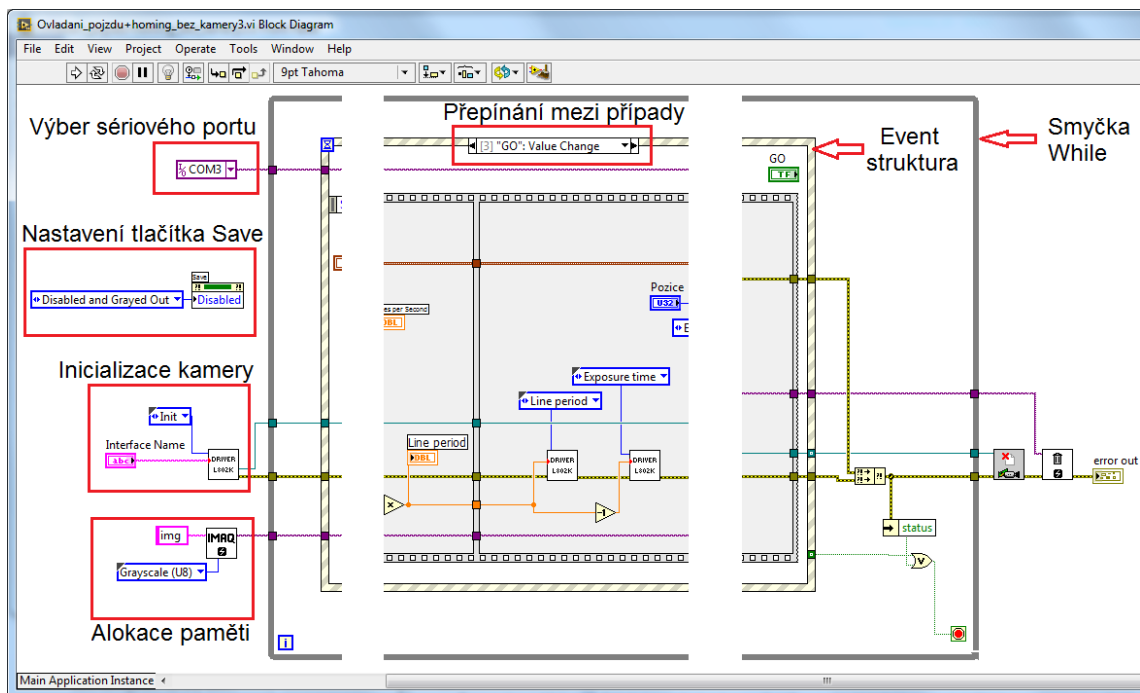
- Konfigurace pojezdu a výpočet řádkové frekvence (synchronizace)
- Snímání obrazu
- Uložení obrazu

Tuto aplikaci (viz obrázek 3.21) jsem naimplementoval tak, aby měl uživatel plnou kontrolu nad celým procesem. Program je ovládán několika tlačítky, která jsou umístěna na čelním panelu.



Obrázek 3.21: Čelní panel aplikace pro snímání obrazu

Aby bylo možné odchytit události vyvolané stisknutím tlačítka, je nutné použít Event strukturu. Tato struktura má několik případů (angl. case), kdy každý z nich reaguje na předdefinované události, jako je například stisknutí tlačítka. Aby tato struktura reagovala na činnost uživatele po celou dobu běhu programu, je nutné ji vnořit do smyčky While (viz obrázek 3.22). Ta zajišťuje neustálou interakci, dokud uživatel neukončí běh aplikace. Při použití smyčky While je žádoucí, aby veškeré inicializační funkce, které proběhnou pouze při startu programu, byly před touto smyčkou. Jak je vidět na obrázku 3.22, tak se jedná o alokaci paměti pro výsledný snímek, inicializaci kamery, nastavení tlačítka „Save“ a volbu portu, na který je pojezd připojen.



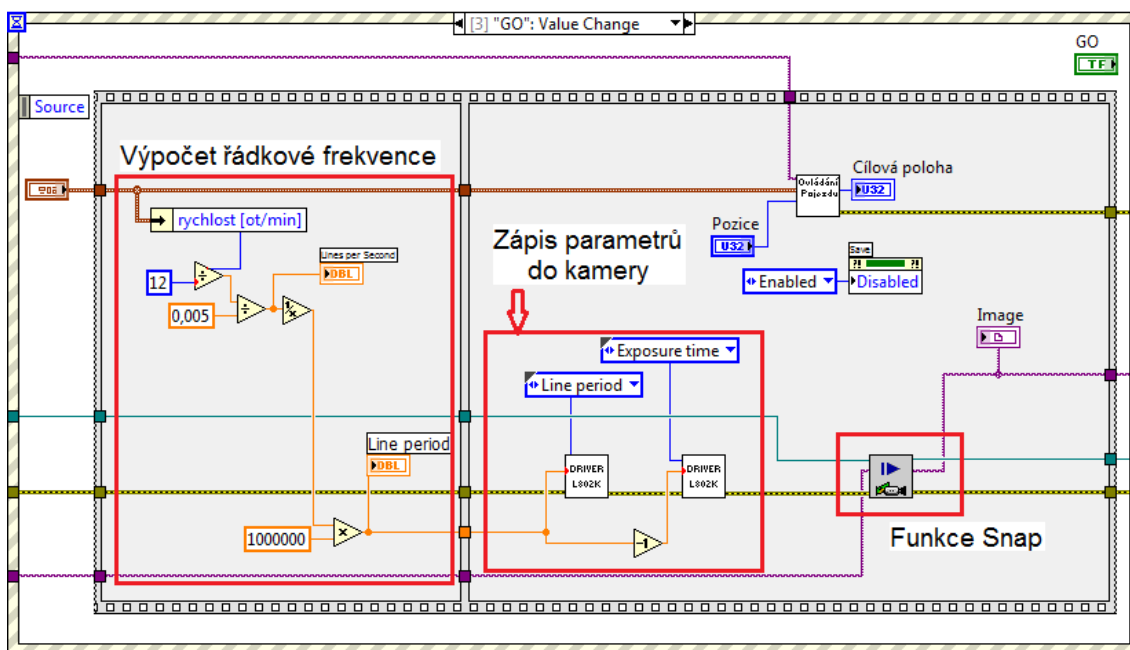
Obrázek 3.22: Ukázka z blokového diagramu aplikace pro snímání obrazu

Konfigurace pojezdu zahrnuje komunikaci pomocí sériového rozhraní RS232. Pomocí tohoto rozhraní se posílají příkazy, kam a jak rychle se má pojezd pohybovat. Tyto hodnoty se nastavují pomocí vstupních parametrů na čelním panelu (viz obrázek 3.23).

Obrázek 3.23: Nastavitelné parametry pro rychlost pojezdu

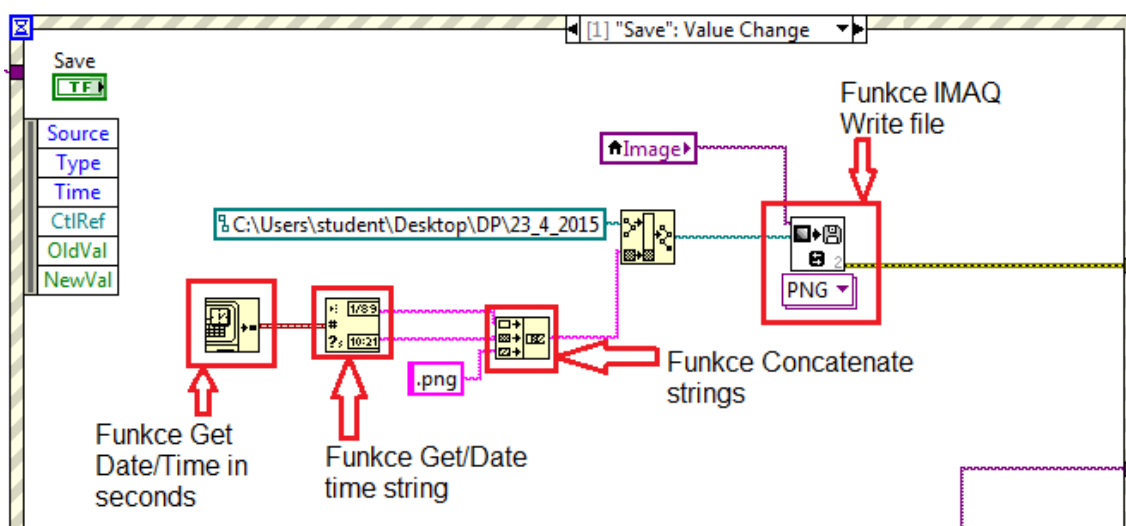
Proměnná „*rychlost [ot/min]*“ je důležitá i v průběhu programu, jelikož je to měnitelný parametr. Nemůže být proto umístěna před smyčkou While. Používá se pro výpočet řádkové frekvence, kterou kamera bude snímat, aby nedošlo k deformaci obrazu. (viz obrázek 3.24). Kamera L802k ale obsahuje parametr „*Line Period*“, je proto nutné přepočítat řádkovou frekvenci na tento parametr. Nakonec jsou nastavené a vypočítané hodnoty zapsány do pojezdu a do kamery.

Jakmile jsou kamera a pojezd synchronizovány, dojde k pořízení snímku. To je realizováno pomocí funkce „*Snap*“, která nasnímaný obraz vykreslí na čelní panel.



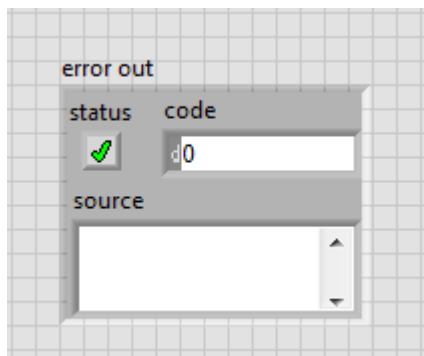
Obrázek 3.24: Ukázka blokového diagramu s vyznačeným výpočtem řádkové frekvence, zápisem do kamery a funkcí „Snap“

Posledním krokem je uložení obrazu. To proběhne po stisknutí tlačítka „Save“. Obraz se uloží jako PNG soubor a jeho název bude mít tvar Aktuální_datum_aktuální_čas.png, což zajišťují funkce zvýrazněné na obrázku 3.25. První z nich („Get Date/Time in Seconds“) předá aktuální čas a datum v podobě časového razítka druhé funkci („Get Date/Time string“) a ta převede čas i datum na řetězec znaků. Poté jsou pomocí funkce „Concatenate Strings“ spojeny za sebe spolu s příponou .png. Nakonec dojde k samotnému uložení pomocí funkce „IMAQ Write File“.



Obrázek 3.25: Ukázka blokového diagramu pro uložení nasnímaného obrázku na disk

Pokud dojde v průběhu programu k chybě, je aplikace zastavena a číslo spolu s názvem chyby jsou zobrazeny na čelním panelu (viz obrázek 3.26). V případě zastavení aplikace uživatelem nebo v důsledku chyby dojde k ukončení komunikace s kamerou a uvolnění paměti, kterou zabíral snímek. Také tyto funkce se umísťují mimo smyčku While, protože se vykonají pouze jednou, a to při ukončení aplikace.



Obrázek 3.26: Indikátor (Error Cluster) pro zobrazení případné chyby v programu

3.3.2 Algoritmus pro rozdělení obrazu na jednotlivé bižuterní kameny

Tento algoritmus realizuje myšlenku paralelního vyhodnocování kamenů. Jeho funkcí je rozdělit nasnímaný obraz celé destičky z řádkové kamery na mnohem menší podobrazy jednotlivých kamenů, které lze poté vyhodnocovat naprosto odděleně.

Aby tento algoritmus fungoval správně a nedocházelo ke špatnému rozřezání obrazu (například oříznutí kamene), je nutné zajistit, aby horizontální průsečnice středů kamenů usazených v destičce byla vodorovná se senzorem s tolerancí několika pixelů. Tato tolerance se odvíjí od vzdáleností jednotlivých kamenů na destičce. Dále je nutné provést kalibraci. Tím je myšleno nalezení prvního kamene v první řadě, od kterého se poté budou odvíjet pixelové vzdálenosti ostatních kamenů. Toho můžeme docílit čtyřmi způsoby.

Nejjednodušším způsobem z programového hlediska je mechanicky vytvořit na destičce kalibrační kříž, který bude vždy na stejném místě vůči dírák pro kameny. Algoritmus pak detekuje tento znak a nastaví parametry pro rozdělení obrazu. Zároveň může tento kalibrační znak sloužit jako diferenční znak. Podle jeho tvaru nebo velikosti by pak bylo možné rozlišit, o jaký typ destičky (respektive velikost nebo typ bižuterních kamenů) se jedná a podle toho by se použila určitá varianta programu.

Druhým, ale výpočetně nejsložitějším, je nalezení prvního kamene programově. Algoritmus by musel nejdříve nalézt jeho polohu. To buď pomocí hran, hledání vzoru nebo hledání skupiny pixelů, která by splňovala určitá kritéria. Nakonec by musel určit střed detekovaného kamene, od kterého by se odvíjely další funkce. Tento způsob je nejvíce náchylný na programovou chybu. Nemusí být například detekován správně první kámen, střed kamene může být určen s chybou, která se s rostoucím počtem řad kamenů v obraze stupňuje, nebo může dojít k situaci, kdy první kámen v destičce bude úplně chybět a detekován tak bude až druhý kámen. Tyto problémy, které mohou nastat, by bylo nutné dodatečně programově ošetřit.

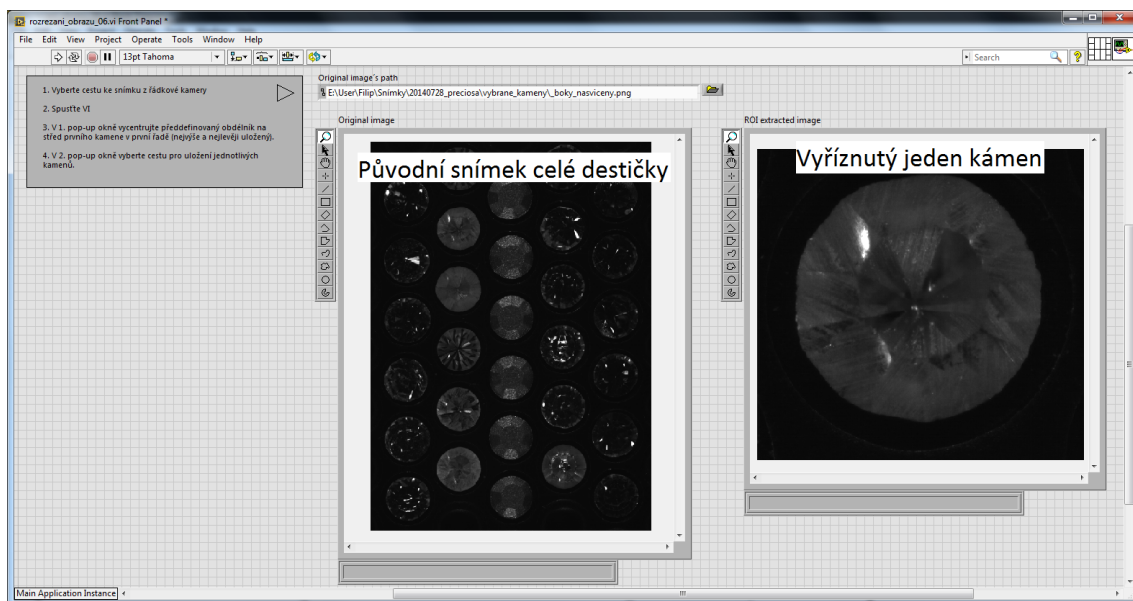
Třetím způsobem je použití optické nebo jiné mechanické závory či čidla. Tento prvek by detekoval průjezd destičky a vyslal by triggrovací signál do kamery, kterým by se odstartovalo snímání. Polohy kamenů by pak mohly být pevně definované, protože by výsledný nasnímaný obraz vypadal vždy totožně.

Posledním způsobem je zapojení člověka. Program by se choval tak, že umístění prvního kamene (prázdné díry) musí vybrat obsluha. Rozměry vybraného ROI se při výběru programově přizpůsobí. Tento způsob je velmi náchylný na lidskou chybu a nejvíce náročný na výsledný čas. Pro mé testovací účely je však takový způsob dostačující, a proto jsem použil tento typ algoritmu. Všechny čtyři varianty, které jsem popsal, se liší pouze v první fázi algoritmu (výběru prvního kamene). Obecně je další fáze pro všechny způsoby společná, protože se jedná jen o nastavení vzdáleností mezi kameny, rozřezání obrazu a uložení jednotlivých podobrázků.

Celý algoritmus lze rozdělit na několik částí, které postupně popíši:

- Načtení snímku
- Nalezení prvního kamene
- Rozřezání obrazu a uložení podobrázků jednotlivých kamenů na disk

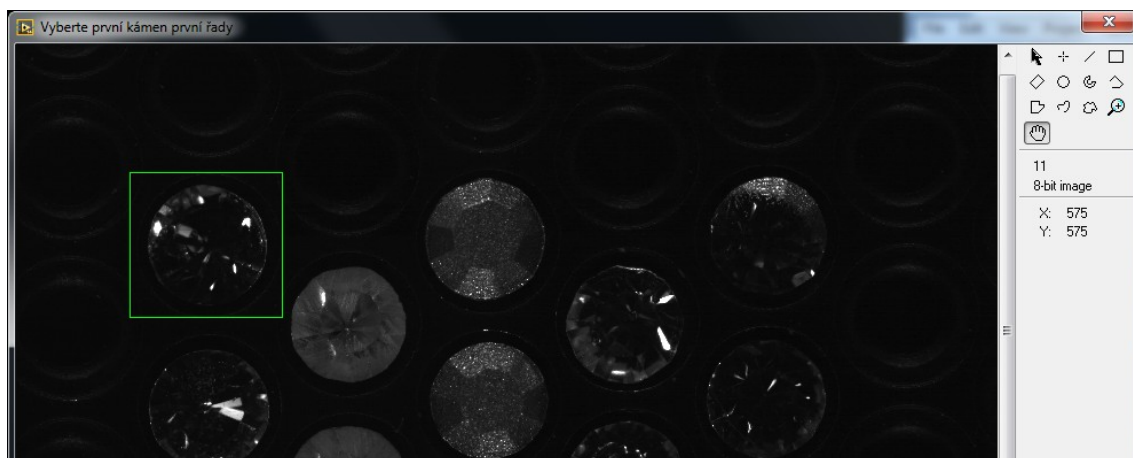
Snímek je možné v aplikaci (viz obrázek 3.27) načíst dvěma způsoby. Prvním z nich je použití již nasnímaného obrázku, který byl předtím uložen na disk. Druhá možnost zahrnuje využití algoritmu pro snímání obrazu, který je popsán v kapitole 3.3.1. Výstupem této části je snímek celé usazovací destičky s kameny, který je načtený v paměti.



Obrázek 3.27: Čelní panel aplikace pro rozřezání obrazu

Aplikace poté zobrazí tento snímek v novém okně a uživatel musí označit první kámen v obraze pomocí předdefinovaného ROI (viz obrázek 3.28). Tato část bude muset být v budoucnu přepsána a zautomatizována, aby nedocházelo k časovým prodlevám a popřípadě

chybám vlivem špatného označení. Pro experimenty v laboratorních podmínkách je však tento postup prozatím dostačující.



Obrázek 3.28: Označení prvního kamene v první řadě pomocí předdefinovaného ROI (zelený čtverec)

Jakmile je označení prvního kamene potvrzeno, dojde k rozřezání obrazu na části, které obsahují jednotlivé kameny. Obraz celé destičky je procházen od levého horního rohu k pravému dolnímu a vždy po určitém úseku, jehož délka je předdefinována pro danou velikost kamene a destičky, je uložen obraz jednoho kamene na disk. Toto procházení probíhá ve dvou cyklech FOR, kdy vnější smyčka zajišťuje posun po řadách kamenů a vnitřní smyčka prochází danou řadu po jednotlivých kamenech. Takto připravené obrazy bižuterních kamenů lze poté vyhodnocovat zcela nezávisle.

4 Optimalizace rychlosti zpracování

Množství nasnímaných bižuterních kamenů za časovou jednotku a rychlost zpracování obrazových dat závisí na několika bodech:

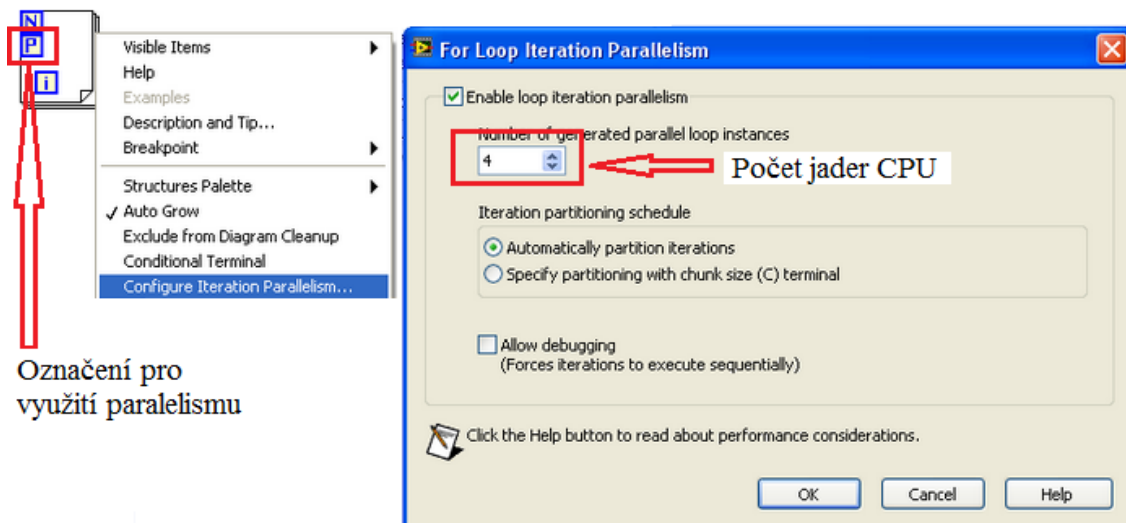
- řádková frekvence kamery,
- rozlišení obrazu,
- komunikační rozhraní pro přenos obrazových dat
- rychlost aplikovaných algoritmů,
- hardware koncového zařízení, na kterém bude probíhat výsledná inspekce.

Maximální řádková frekvence kamery omezuje rychlost, s jakou se může snímáný objekt pod optickou soustavou pohybovat (kvůli synchronizaci). Na tomto parametru tak závisí, jakou bude mít obraz délku (respektive výšku), neboli počet pixelových řádků. Použitím rychlejší kamery je možné docílit nasnímáný většího množství těchto řádků za časovou jednotku. Je tak možné nasnímat větší plochu usazovací destičky s bižuterními kameny, a tedy i více bižuterních kamenů.

Další parametr, který ovlivňuje počet nasnímaných kamenů, je potřebné rozlišení na jeden kámen. Současná optická soustava byla navržena tak, aby měl kámen velikosti SS12 rozlišení cca 500 pixelů (viz kapitola 3.2.2 obrázek 3.14). Pokud by bylo možné potřebné rozlišení snížit, lze zvýšit šířku snímaného řádku, který by tak mohl pojmout větší množství kamenů v jedné řadě otvorů v destičce. Zvětšení zorného pole je možné docílit výměnou současného objektivu za větší.

K přenosu nasnímaných obrazových dat do počítače slouží komunikační rozhraní kamery. Typ rozhraní určuje, jaký objem dat je možné přenést za časovou jednotku. Rozhraní Camera Link se jeví jako velmi dobře použitelné i do budoucna, pokud by bylo potřeba přenášet větší množství dat než nyní. Maximální objem dat, který je možné vzhledem k rozlišení a řádkové frekvenci kamery L802k přenést nyní, činí zhruba 77 MB/s. Přenosová rychlost, kterou poskytuje rozhraní Camera Link Base, však poskytuje 255 MB/s (viz kapitola 1.5.4). Typ přenosového rozhraní se tak jeví jako místo optické soustavy, které nebude potřeba měnit ani v budoucnu.

Po přenosu dat do počítače následuje jejich zpracování, o které se starají jednotlivé algoritmy. Obecně lze říci, že algoritmy, které zpracovávají a analyzují obraz, jsou časově náročné. Výsledná rychlost algoritmu pak závisí nejen na tom, jak je napsán, ale i na hardwaru počítače. Při tvorbě algoritmu je proto vhodné co nejvíce využít možnost paralelizace, pokud to HW dovoluje. Díky využití data flow v LabVIEW se paralelizace částečně tvoří zcela automaticky (viz kapitola 3.1). Dále je možné ještě lépe využít všechna procesorová jádra při použití smyčky FOR (viz obrázek 4.1). Další možnosti urychlení zpracování dat v LabVIEW přichází s použitím programovatelného hradlového pole (FPGA) a grafických procesorů (GPU).



Obrázek 4.1: Využití zpracování smyčky FOR na více jádrech CPU v LabVIEW

Myšlenku, jak vyřešit inspekci velkého množství bižuterních kamenů umístěných v ploše za jednu vteřinu, představuje algoritmus na rozdělení obrazu (viz kapitola 3.3.2). Principem je rozdělit celkovou úlohu na mnoho podúkolů, které bude možné řešit paralelně, čímž dojde k výraznému snížení času, který je nutný pro vyhodnocení kamenů. Prvním krokem je rozčlenění snímku z kamery na menší části, konkrétně na jednotlivé kameny. Na vstupu algoritmu pro rozdělení obrazu je jeden snímek s velkým rozlišením, ale výstupem je mnoho malých snímků s rozlišením neúměrně menším. Aplikování algoritmu pro rozdělení obrazu na jednotlivé BK napomáhá fakt, že kameny jsou v destičce usazeny v matici, která je neměnná. V paměti je v danou chvíli uloženo určité množství malých obrázků, které je nutné vyhodnotit. Každý takový obrázek je možné analyzovat nezávisle na ostatních, jelikož informace, které jsou výstupem analýzy jednoho kamene, nejsou potřebné pro analýzu ostatních. V tomto místě bude vhodné v budoucnu využít FPGA nebo GPU. Výsledky těchto paralelních analýz, pak budou poslány do nadřazené části programu, který se bude starat o vyjmutí určitých kamenů z destičky.

5 Zhodnocení dosažených výsledků závěrečné práce

V průběhu výzkumu jsem narazil na několik typů problémů, které se podařilo lépe či hůře vyřešit. Prvním z nich byl návrh optické soustavy, jejíž současné komponenty jsou:

- řádková kamera L802k od firmy Basler,
- telecentrický objektiv TC16M36 od firmy OptoEngineering,
- dvě řádková světla Effiflex od firmy Effilux,
- usazovací destička se zkoumanými bižuterními kameny.

Popisované komponenty jsou vyobrazeny v kapitole 3.2.2 na obrázcích 3.10-3.15.

Naprostou novinkou je nasazení řádkové kamery. Řádkové kamery se sice ve strojovém vidění běžně používají, ale dosud se ještě nevyskytla aplikace, která by se zabývala podobným problémem, který popisuje tato práce. Obecný princip řádkové kamery, který se dá přirovnat ke kancelářskému skeneru, dává tomuto řešení potenciál i do budoucna. Novější typy kamer dnes totiž nabízejí ještě vyšší rozlišení v řádku a také větší řádkovou frekvenci. To znamená, že zkoumaný objekt se může pod kamerou pohybovat rychleji a výběrem většího objektivu je pak možné docílit toho, že kamera nasnímá mnohem širší zorné pole při zachování požadovaného počtu pixelů na jeden kámen. Čím je však rozlišení kamery vyšší, tím jsou jednotlivé pixely menší, čímž klesá jejich citlivost. Například kamera s rozlišením 4080 px má pixely velké 7 mikronů, ale model L802k s rozlišením 8160 px má pixely velké jen 5 mikronů. Tím je užitečná plocha světlocitlivé buňky téměř 2x menší a je proto nutné zajistit mnohem více světla.

Nasazení telecentrického objektivu je ve strojovém vidění také poměrně běžná věc. Často je potřeba získat obraz, který není směrem k okrajům zkreslený. I některé širokoúhlé objektivy jsou natolik kvalitně vyrobeny, že je jejich zkreslení téměř nulové, ale zatím nedosahují takové jakosti jako TC objektivy. TC objektivy se vyrábějí v mnoha velikostech a zorné pole, které jsou schopny zachytit, se odvíjí od velikosti čela objektivu. Volbou většího objektivu lze tak docílit nasnímání širšího zorného pole, což také zvýší množství kamenů, které kamera nasnímá za časovou jednotkou.

Nejsložitější komponentou je v této aplikaci osvětlení, jelikož se kontrolují opticko-estetické objekty, které veškeré světlo, jenž do nich vstoupí, vyvážou zpět ven. Je proto nutné použít osvětlení, které splňuje tyto podmínky:

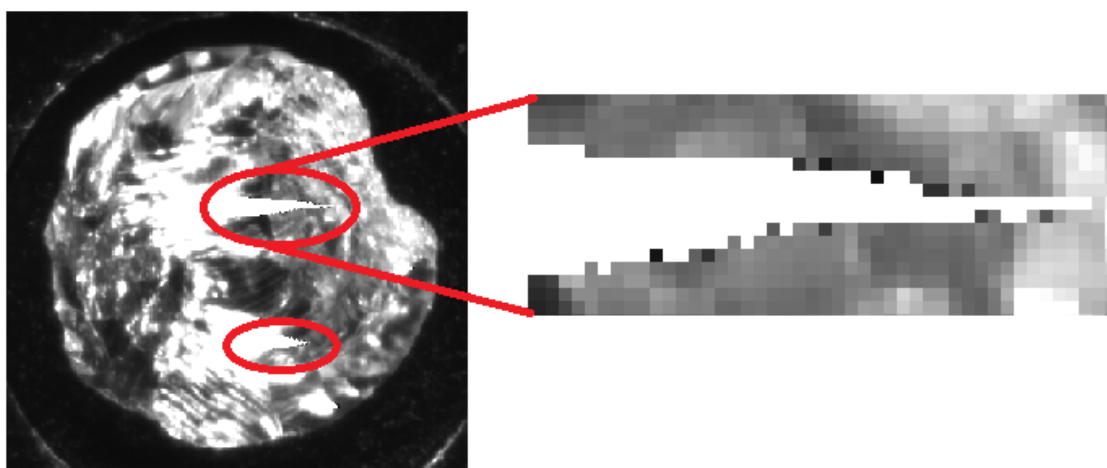
- vysoká fokusace – úzký vyzařovací úhel,
- homogenita – stejně intenzivní osvětlení po celé délce řádku,
- vysoká intenzita – kvůli krátké expoziční době.

Díky experimentům se však ukázalo, že dvě řádková osvětlení nejsou ve všech případech dostatečná. Obsahuje-li bižuterní kámen vadu, která je uvnitř něj, je současné osvětlení vyhovující. Pokud je však vada na povrchu kamene (především se jedná o vady simulizační vrstvy – přetažené, obrácené simili), nedochází k homogennímu osvětlení kamene

ze všech stran. Je proto nutné zabývat se i nadále výběrem vhodného osvětlení. Další poznatky, které experimenty přinesly, se týkají vzdálenosti světla od objektu a jejich úhlu svícení na objekt. Vzdálenost světla od objektu není příliš podstatná za podmínky, že je zachována dostatečná intenzita osvětlení. Volba nejvhodnějšího úhlu, pod kterým světla svítí na kameny, je podrobně popsána v kapitole 3.2.2. Zkráceně se jedná se o to, aby se do kamery neleskla ani tabulka, ani žádná z faset kamene a bylo tak vidět do vnitřní struktury.

Aby výsledný obraz nebyl deformovaný, bylo třeba zajistit synchronizaci řádkové kamery a pojezdu. Toho jsem docílil aplikováním vzorce pro synchronizaci (viz Vzorec 3.1). Tento vzorec má jako vstupní proměnné velikost pixelu, rychlost pojezdu a zvětšení objektivu. Výstupem je pak řádková frekvence, kterou je nutné nastavit na kameře. Řádková frekvence velmi úzce souvisí s expoziční dobou. Čím delší je expoziční doba, tím menší řádkovou frekvenci je možno použít. Je proto nutné i tento parametr přizpůsobit tak, aby nedošlo k porušení synchronizace.

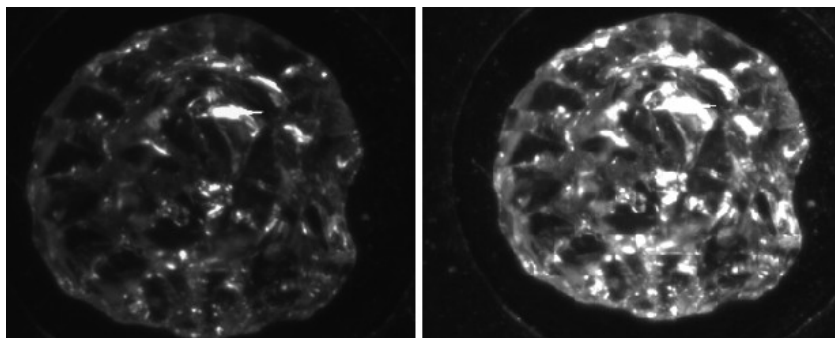
Expoziční doba velmi souvisí také s jedním efektem, který je velice nežádoucí a ve finálním ohodnocení kamene hraje podstatnou roli. Jedná se o tzv. blooming efekt. Tento jev je typický pro kamery s CCD čipem (charge-coupled device) a způsobuje rozlévání náboje z jedné buňky do okolí v jednom směru (viz obrázek 5.1). V obraze pořízeném řádkovou kamerou se blooming projevuje jako vodorovná úsečka vycházející z odlesku, která má intenzitu 255 a může být zakončena zcela černým pixelem s hodnotou 0 (viz obrázek 5.1). Existují dvě řešení, jak tento efekt potlačit. Prvním z nich je snížení expoziční doby (popřípadě snížení intenzity osvětlení) na takovou hladinu, při které tento jev již nenastane, tedy takovou, při které v obraze nebude odlesk s hodnotou 255. Vzhledem k charakteristice zkoumaného objektu je však tato varianta nevyhovující. Druhým způsobem, jak blooming odstranit (nebo alespoň zmenšit) je použití kamery s CMOS čipem (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor). Tento čip není díky své konstrukci tolik náchylný na rozlévání náboje.



Obrázek 5.1: Blooming efekt na kameře s CCD čipem

Dalším poznatkem, který vychází z experimentů, je způsob využití celé škály šedé, tedy všech 255 hodnot. Je to vlastnost obrazu, která ulehčuje následné detekování vad v kamenech.

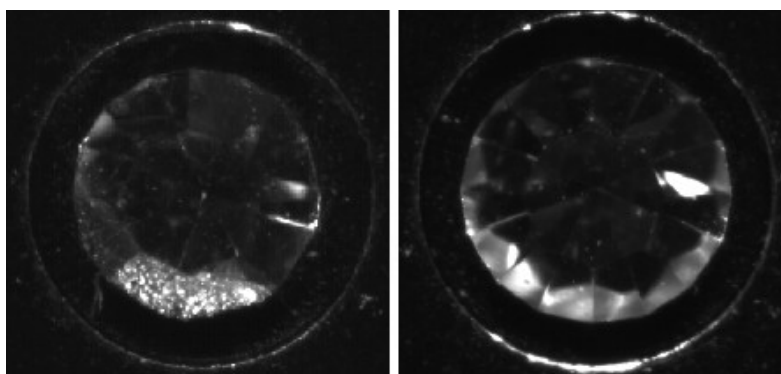
Lze toho docílit buď změnou expoziční doby, nebo parametru gain (zisk). S odkazem na předchozí odstavec je jasné, že expoziční dobu není vhodné zvyšovat. Testoval jsem tedy využití parametru gain. Ukázalo se, že při gain = 0 dB je maximální hodnota pixelu v obraze (vyjma odlesků) 50. To znamená, že škála šedé je využita pouze z dvaceti procent. Zvýšením parametru gain lze docílit mnohem lepšího využití osmibitové informace o každém pixelu a zároveň nedojde ke vzniku nebo zhoršení blooming efektu (viz obrázek 5.2).



Obrázek 5.2: Srovnání kamene nasnímaného při gain = 0 dB (vlevo) a při gain = 10 dB

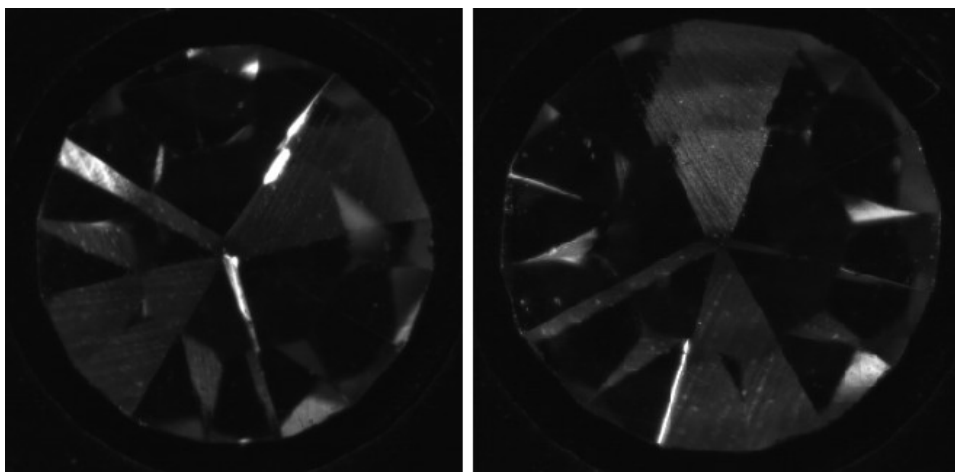
Shading correction je další funkce kamery, kterou jsem zkoumal. Jedná se o kalibraci všech světlocitlivých buněk tak, aby stejné množství fotonů vygenerovalo stejné množství náboje v buňkách. Ukázalo se, že čip této kamery je vyroben velice kvalitně a v současné době netrpí degradací vlivem času. Aplikování této funkce nemělo proto žádný statisticky významný vliv na výsledné snímky.

Problémem, který se vyskytl u dobrých kamenů, je rozsvícený lem (viz obrázek 5.3). Nejprve byl tento artefakt považován za vadu kamene, a testoval jsem proto možnost, že se jedná o nevhodné nasvícení kamene a tím dochází k odlesku v oblasti lemu. Ukázalo se však, že se jedná o výrobní vadu, která není lidským okem vidět ani pod mikroskopem. Je proto možné takový kámen zařadit mezi dobré. Tento artefakt však vykazuje na první pohled podobnou charakteristiku jako vada „přetažené simili“ (viz obrázek 5.3). Pro odlišení dobrého kamene od vadného je proto nutné zaměřit se také na strukturu rozsvícené oblasti, nikoli pouze na intenzitu. Jak je vidět na obrázku 5.3, rozsvícený lem má strukturu hladkou, kdežto přetažené simili ne. To lze využít pro rozlišení těchto dvou vad bižuterních kamenů.



Obrázek 5.3: Srovnání vad přetažené simili (vlevo) a rozsvíceného lemu u dobrého kamene

Dalším problémem se jeví veliký vliv natočení kamene kolem své osy na přítomnost nežádoucích odlesků na hranách faset. Experimenty ukázaly, že ten samý kámen v jedné poloze obsahuje nežádoucí odlesk, ale při pootočení o několik desítek stupňů tento odlesk zmizí (viz obrázek 5.4). Jedná se tedy o náhodný jev, který v tuto chvíli nelze eliminovat, protože je k dispozici pouze jeden zdrojový obraz. Pokud by zdrojových obrazů bylo více, mohla by být aplikována obrazová fúze, která by tyto nežádoucí a náhodné odlesky eliminovala. Toho lze docílit pouze použitím více totožných optických soustav, které budou stejně nakonfigurovány a ze kterých bude získán snímek s totožnou polohou jednotlivých kamenů. Ideální případ by byly čtyři soustavy, které by destičku snímaly vždy pouze s jedním osvětlením pokaždé z jiné strany.



Obrázek 5.4: Ukázka vlivu natočení kamene na nechtěné odlesky

Závěr

Výsledkem této diplomové práce je vhodná optická soustava pro snímání skleněných tvarových kamenů umístěných v ploše, algoritmus pro získání obrazu z kamery a algoritmus pro rozdělení obrazu. V rámci této diplomové práce bylo dále provedeno mnoho experimentů týkajících se osvětlení a jeho vlivu na nežádoucí a nechtěné odlesky v bižuterních kamenech a také byl otestován vliv určitých parametrů kamery na výsledný obraz.

Výsledná optická soustava obsahuje řádkovou kameru L802k od firmy Basler, telecentrický objektiv TC16M36 od firmy OptoEngineering, dvě řádková světla Effiflex od firmy Effilux a zkoumaný objekt – usazovací destičku s bižuterními kameny. Jednotlivé součásti jsou vyobrazeny v kapitole 3.2.2 na obrázcích 3.10-3.15. Komponenty byly vybrány s ohledem na velikost zorného pole, potřebné rozlišení na jeden kámen a potřebné rychlosti snímání. Z hlediska dalšího vývoje je možné použít kameru s vyšší řádkovací frekvencí a větším rozlišením a TC objektiv, který umožní vykreslit větší zorné pole na řádkový senzor kamery.

Algoritmy, které byly v rámci této DP vytvořeny, jsou přizpůsobeny modelovému zařízení a dané optické soustavě, ale jejich modulární struktura umožňuje velmi snadno přidat nebo upravit jednotlivé části kódu. To umožňuje využití a rozšíření těchto algoritmů i do budoucna například pro jiný typ kamery, jiný způsob synchronizace nebo přidání nové funkcionality. Algoritmy byly vytvořeny v programovacím prostředí LabVIEW.

Experimenty, které se týkaly vhodného osvětlení, přinesly poznatky, jenž vyústily ve výběr řádkového osvětlení, které musí být velmi intenzivní, homogenní, fokusované a musí svítit pod vhodným úhlem tak, aby nedocházelo k odleskům na tabulce nebo fasetách bižuterního kamene.

Kamera byla konfigurována pomocí programů MAX a CCT+. V programu MAX byly nastavovány parametry pro rozlišení výsledného obrazu. V programu CCT+ byly nastavovány parametry výstupní datový mód, režim snímání, expoziční doba, řádková frekvence, gain a shading correction. Cílem experimentů bylo nastavit tyto parametry tak, aby byl výsledný obraz co nejvíce vyhovující pro další zpracování. To znamená, aby byla využita celá škála šedé (vhodná kombinace parametrů *Exposure Time* a *Gain*) a aby obraz nebyl deformován vlivem nedodržení pravidel pro synchronizaci. Dále byla testována funkce shading correction, aby jednotlivé světlocitlivé buňky vytvořily stejné množství náboje pro stejné množství dopadajících fotonů.

Využití řádkové kamery pro snímání bižuterních kamenů je velice vhodné z pohledu dalšího vývoje. Na základě zkušeností nabytých s kamerou L802k je možné použít jinou, rychlejší řádkovou kameru, která v kombinaci s vhodným objektivem umožní snímat ještě větší množství bižuterních kamenů za časovou jednotku. S tím souvisí větší množství dat, které bude nutné zpracovat. Aby bylo dosaženo rozhodování o kvalitě bižuterních kamenů v reálném čase, bude nutné v budoucnu uvažovat o využití GPU nebo FPGA pro zpracování těchto obrazových dat.

Použitá literatura

- [1] Zrakový orgán. *Zrak.cz* [online]. [2013] [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.zrak.cz/o-vasem-zraku/zrakovy-organ.html>
- [2] LAUKO, Michael. Aplikace strojového vidění ve včelařství [online]. Brno, 2013 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://is.mendelu.cz/lide/clovek.pl?zalozka=13;id=15168;studium=41833;zp=36953;download_prace=1. Diplomová práce. Mendelova univerzita. Vedoucí práce Ing Oldřich Trenz, Ph.D.
- [3] Hlaváč, V., Šonka, M. Počítačové vidění, Praha: Grada 1992. ISBN 80-85424-67-3
- [4] Šonka, M., Hlaváč, V., Boyle, R. Image Processing, Analysis, and Machine Vision, 3rd edition, Thomson Learning, Toronto, April 2007, 821 p, ISBN 049508252X. Dostupné z: <http://www.icaen.uiowa.edu/~dip/LECTURE/lecture.html>
- [5] GŘEŠ, Tomáš. DÍL 1: ŘÁDKOVÉ KAMERY – TYPY A TECHNOLOGIE. *VisionX - Průmyslové kamery a systémy pro strojové vidění* [online]. 6.3.2014 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.visionx.cz/know-how/line-scan-velky-pruvodce-radkovymi-kamerami/dil-1-radkove-kamery-typy-a-technologie/>
- [6] ŠEVČÍK, Zbyněk. Objektiv – oko fotoaparátu – díl první. *DTPko* [online]. 27.8.2012 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.dtpko.cz/redakce/wp-content/uploads/2012/08/04-oko-dil1.jpg>
- [7] Slovník pojmů. *Intraco* [online]. ©2015 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.mikroskopy-intraco.cz/stranky/uzitecny-slovník/mikroskopicky-serial.htm>
- [8] ŠEVČÍK, Zbyněk. Objektiv – oko fotoaparátu – díl první. *DTPko* [online]. 27.8.2012 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.dtpko.cz/clanky/objektiv-oko-fotoaparatu-dil-prvni/>
- [9] Co musí umět každý objektiv, aby fotky stály za to. Podrobný průvodce. LIBICH, Jan. *Technet.cz* [online]. 15.11.2007 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://technet.idnes.cz/co-musi-umet-kazdy-objektiv-aby-fotky-staly-za-to-podrobny-pruvodce-11m-/tec_foto.aspx?c=A071108_120848_tec_foto_jlb
- [10] Kouzlo telecentrických objektivů. *Průmyslové-kamery.cz* [online]. 11.1.2012 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.prumyslove-kamery.cz/clanky-a-aktuality/clanky?pg=441>
- [11] Telecentric lenses tutorial. *OptoEngineering* [online]. © 2015 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.opto-engineering.com/resources/telecentric-lenses-tutorial>
- [12] Objektivy pro strojové vidění. *Analýza obrazu* [online]. © 2011–2015 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.analyza-obrazu.cz/objektivy/>

- [13] ŠEVČÍK, Zbyněk. Objektiv – oko fotoaparátu – díl první. *DTPko* [online]. 27.8.2012 [cit. 2015-04-30].
Dostupné z: <http://www.dtpko.cz/redakce/wp-content/uploads/2012/08/05-oko-dil1.jpg>
- [14] Vignetting. *Superman Igloo* [online]. 26.4.2011 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://ryanh.egloos.com/m/2761288>
- [15] GŘEŠ, Tomáš. ZOBRAZENÍ VNITŘNÍHO NAPĚTÍ VE SKLE A PLASTU. *VisionX - Průmyslové kamery a systémy pro strojové vidění* [online]. 12.9.2013 [cit. 2015-04-30].
Dostupné z: <http://www.visionx.cz/know-how/zobrazeni-vnitriho-nap-ti-ve-skle-a-plastu/>
- [16] Polarisation filter – polarizační filtr Polarizační filtr je jeden z nejčastěji používaných a nejužitečnějších filtrů ve fotogra. *Megapixel.cz* [online]. © 2001–2015 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.megapixel.cz/polarisation-filter>http://en.wikipedia.org/wiki/Polarized_3D_system
- [17] NEUTRÁLNÍ ŠEDÉ FILTRY. *VisionX - Průmyslové kamery a systémy pro strojové vidění* [online]. © 2015 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.visionx.cz/produkty/podle-vyrobce/schneider-kreuznach/filtry/neutralni-sede-filtry/>
- [18] BP 465-70. *Schneider Kreuznach* [online]. © 2015 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.schneiderkreuznach.com/en/industrial-solutions/industrial-filters/products/filter-types/bandpass/bp-465-70/>
- [19] BAREVNÉ A NIR FILTRY. *VisionX - Průmyslové kamery a systémy pro strojové vidění* [online]. © 2015 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.visionx.cz/produkty/podle-vyrobce/schneider-kreuznach/filtry/barevne-a-nir-filtry/>
- [20] SOUČEK, Jiří. Využití chromatické aberace. *Diit.cz* [online]. 4.5.2011 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://diit.cz/clanek/vyuziti-chromaticke-aberace>
- [21] SPRÁVNÉ NASVÍCENÍ v počítačovém vidění. *VisionX - Průmyslové kamery a systémy pro strojové vidění* [online]. © 2015 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://www.visionx.cz/site/assets/files/1271/seminar_visionx_2014_osvetlovace.pdf
- [22] Ring Lights [Direct Lighting]. *CCS INC.* [online]. © 2015 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://www.ccs-grp.com/s2_ps/src/pro_sr/1/1/0/0/e.html
- [23] Bar Lights [Direct Lighting]. *CCS INC.* [online]. © 2015 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://www.ccs-grp.com/s2_ps/src/pro_sr/1/1/3/0/0/e.html#sr
- [24] Low-angle Ring Lights [Direct Lighting]. *CCS INC.* [online]. © 2015 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://www.ccs-grp.com/s2_ps/src/pro_sr/1/1/2/0/0/e.html#sr
- [25] Dome Lights [Direct Lighting]. *CCS INC.* [online]. © 2015 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://www.ccs-grp.com/s2_ps/src/pro_sr/1/1/9/0/0/e.html#sr

- [26] Coaxial Lights [Direct Lighting]. *CCS INC.* [online]. © 2015 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://www.ccs-grp.com/s2_ps/src/pro_sr/1/1/10/0/0/e.html#sr
- [27] Flat Lights [Direct Lighting]. *CCS INC.* [online]. © 2015 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://www.ccs-grp.com/s2_ps/src/pro_sr/1/1/7/0/0/e.html#sr
- [28] GenICam. *Pleora Technologies* [online]. © 2015 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.pleora.com/about-us/standards-leadership/genicam>
- [29] GRĚŠ, Tomáš. KOMUNIKAČNÍ ROZHRANÍ VE STROJOVÉM VIDĚNÍ. *VisionX - Průmyslové kamery a systémy pro strojové vidění* [online]. 27.5.2013 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.visionx.cz/know-how/srovnani-nejpouzivanejsich-komunikacnich-rozhrani-ve-strojovem-videni/>
- [30] GigE Vision. *Pleora Technologies* [online]. © 2015 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.pleora.com/about-us/standards-leadership/gige-vision>
- [31] GigE Vision. *Wikipedia* [online]. 11.4.2015 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/GigE_Vision
- [32] 10 m USB 3.0 cable. *Ximea* [online]. 2.4.2015 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.ximea.com/en/products/usb3-vision-standard-designed-cameras-xiq/xiq-usb-30-accessories/8-m-usb-30-cable>
- [33] USB3 Vision. *Pleora Technologies* [online]. © 2015 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.pleora.com/about-us/standards-leadership/usb3-vision>
- [34] USB 3.0 Interface and USB3 Vision Standard. *Basler* [online]. © 2015 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.baslerweb.com/en/support/knowledge-base/technologies/usb>
- [35] What is DCAM/IIDC?. *National Instruments* [online]. 26.03.2008 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/9FFF247558F4A51C86257418007C95EA>
- [36] VISION STANDARDS: Camera Link – The Only Real-Time Machine Vision Protocol. *AIA Vision Online* [online]. © 2009-2015 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.visiononline.org/vision-standards-details.cfm?type=6>
- [37] VISION STANDARDS: Camera Link HS - The Machine Vision Protocol Moving Forward. *AIA Vision Online* [online]. © 2009-2015 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.visiononline.org/vision-standards-details.cfm?type=10>
- [38] What is CoaXPress?. *CoaXPress* [online]. 24.5.2013 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.coaxpress.com/coaxpress.php>
- [39] VLACH, Jaroslav. *Metody zpracování obrazu pro časově náročné úlohy* [online]. Liberec, 2012 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://www.fm.tul.cz/files/autoreferat_vlach.pdf. Autoreferát Disertační práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce doc. Ing. Milan Kolář, CSc.

- [40] Učební text zbožíznalství - interní dokument PRECIOSA
- [41] ŽÍDEK, Jan. Grafické programování ve vývojovém prostředí LabVIEW. Učební text. Ostrava: VŠB-TUO, 2012
- [42] Vlach, J., Havlíček J., Vlach M. Začínáme s LabVIEW, Praha: BEN – technická literatura, 2008, 247 s. ISBN 978-80-7300-245-9.
- [43] L802k. *Průmyslové-kamery.cz*[online]. © 2015 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://eshop.prumyslove-kamery.cz/CameraLink-14022/319-L802k>
- [44] NI PCIe-1433 1x Camera Link Full 10-Tap, PoCL. *Průmyslové-kamery.cz*[online]. © 2015 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://eshop.prumyslove-kamery.cz/CameraLink/2594-NI-PCIe-1433-1x-Camera-Link-Full-10-Tap-PoCL>
- [45] TC-16M-036. *Optart* [online]. © 2012 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.optart.co.jp/en/tc-16m/731-tc-16m-36.html>
- [46] EFFI-Flex. Framos [online]. © 2015 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.framos.com/products/en/illumination/effi-flex-15437.html>
- [47] GŘEŠ, Tomáš. PARAMETRY KAMERY BASLER ACE. *VisionX - Průmyslové kamery a systémy pro strojové vidění* [online]. 27.5.2013 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.visionx.cz/know-how/parametry-kamery-basler-ace/>
- [48] Aplikace obrazové fúze pro hledání vad. *MTI Ústav mechatroniky technické informatiky* [online]. 25.9.2013 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.mti.tul.cz/files/seminar13/vajgl.pdf>

Seznam příloh

Adresářová struktura přiloženého CD obsahuje 2 složky:

- Složka **source** – obsahuje zdrojové kódy pro algoritmy, který byly vytvořeny v rámci této diplomové práce. Názvy spouštěcích souborů jsou **_rozdeleni_obrazu.vi** a **_snimani_obrazu.vi**
- Složka **thesis** – obsahuje text diplomové práce a naskenované zadání DP